

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**Técnicas de controlo não destrutivo para pesquisa e
medição de espessuras de camada de coque na superfície
interna de feixes tubulares de fornos de refinarias**

Miguel Alexandre Patrício Coelho

Mestrado Integrado em Engenharia Física

Dissertação orientada por:

Dr.^a Ana Maria da Gama Mateus Cabral

Prof.^a Dr.^a Olinda Maria Quelhas Fernandes Conde

Agradecimentos

Gostaria de agradecer às inúmeras pessoas que estiveram envolvidas no acompanhamento deste trabalho, bem como ao Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ) por me ter recebido e tão bem acolhido para a realização desta minha dissertação.

Um agradecimento especial à Prof.^a Dr.^a Olinda Conde, que geriu todo o processo, desde o contacto com o ISQ, até a supervisão enquanto orientadora interna.

Agradeço ainda aos Eng.^o José Sousa, Eng.^o David Alface, Eng.^o José Velhinho e Eng.^o Luís Barros por me terem dirigido e aconselhado durante o meu trabalho prático no ISQ.

Obrigado aos meus pais, amigos e família, que me apoiaram de forma incondicional, mesmo nas situações adversas e inesperadas. Sem eles, este trabalho teria sido – garantidamente – de muito mais difícil conclusão.

Resumo

A tese “Técnicas de controlo não destrutivo para pesquisa e medição de espessuras de camada de coque na superfície interna de feixes tubulares de fornos de refinarias” resulta de um pedido feito pela Galp ao Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ). Este projeto foi realizado em colaboração com o ISQ e visa medir a espessura da camada de coque em tubos de fornos de refinaria através de ensaios não destrutivos.

Os fornos de refinarias criam uma camada que se intitula de coque, sendo esta formada devido às altas temperaturas e à baixa velocidade do petróleo junto à parede interna da estrutura tubular. Esta camada é um isolador e não permite uma correta medição da temperatura do petróleo no interior dos tubos.

Foram abordadas várias técnicas ao longo do período de trabalho, com o intuito de medir a camada coque e descobrir o(s) método(s) viável(eis). As técnicas utilizadas foram assim a radiografia, a gamagrafia e os ultrassons, incluindo EMAT.

Palavras-chave: Coque, ultrassons, radiografia, gamagrafia, EMAT.

Abstract

The thesis “Non-Destructive Control Techniques for Research and Measurement of Coke Layer Thicknesses on the Inner Surface of Refinery Furnace Tubular Beams” results from a request made by Galp to the Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ). This project was carried out in collaboration with ISQ and aims to measure the thickness of the coke layer in refinery furnace tubes through non-destructive techniques.

Refinery furnaces create a so-called coke layer, which is formed due to the high temperatures and the low speed of oil near the inner wall of the tubular structure. This layer is an insulator and does not allow a correct measurement of the oil temperature inside the pipes.

Several techniques were approached throughout the work period, in order to measure the coke layer and to find the viable method(s). Thus, the techniques used were radiography, gammagraphy and ultrasound including EMAT.

Keywords: Coke, ultrasounds, radiography, gammagraphy, EMAT.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Siglas	xiii
Motivação	1
1. Refinarias	3
1.1. Processos de degradação	3
1.1.1. Oxidação	4
1.1.2. Coqueificação	4
2. Ensaaios não destrutivos (END)	7
2.1. Radiografia Industrial	7
2.1.1. Radiografia convencional	8
2.1.2. Radiografia Digital	9
2.2. Ultrassons	9
2.2.1. Tipos de Ondas	11
2.2.1.1. Ondas Longitudinais	11
2.2.1.2. Ondas Transversais	12
2.2.1.3. Ondas Rayleigh	12
2.2.1.4. Ondas Lamb	13
2.2.1.5. Ondas Guiadas	15
2.2.2. Sondas Piezoelétricas	16
2.2.2.1. Sondas direitas	16
2.2.3. Magnetostrição	17
2.2.4. EMAT	17
2.2.4.1. EMAT através de força de Lorentz	18
2.2.4.2. EMAT através da magnetostrição	19
3. Equipamentos e Métodos	21
3.1. Radiografia Industrial (Equipamento)	21
3.1.1. Isótopos	22
3.2. Técnicas Radiográficas	23
3.2.1. Comparador Dimensional	23

3.2.2. Radiografia Tangencial	24
3.2.3. Análise de Imagem	25
3.3. Objeto de estudo.....	27
3.4. Ultrassom convencional	28
3.5. EMAT	29
4. Resultados	31
4.1. Double Wall Single Image (DWSI).....	31
4.2. Tangencial.....	33
4.3. Gamagrafia	37
4.4. Ultrassom convencional	44
4.5. Ultrassom com EMAT	48
5. Conclusão	51
6. Bibliografia	53
A Procedimento de medição da camada de coque de tubos de refinaria através da radiografia	55

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Consumo de energia primária: total e por tipo de fonte de energia (dados adaptados da PORDATA).....	3
Tabela 4.1 - Valores das espessuras do comparador, aço e coque e respetivo erro relativo	40
Tabela 4.2 - Tabela real de valores do comparador, aço, coque e respetiva taxa da progressão.....	41
Tabela 4.3 – Raios X vs Raios Gama.....	44

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Tubo sem Coque vs tubo com Coque [7]	5
Figura 1.2 - Relação entre a temperatura da camada de petróleo e o tempo de permanência no tubo [7]	5
Figura 2.1 - Esquema ilustrativo de um tubo de raios-X [10]	8
Figura 2.2 - Radiografia industrial convencional [9]	9
Figura 2.3 - Exemplo material sem fenda (esquerda) e com fenda (direita) [12]	10
Figura 2.4 - Representação simplificada do leitor de um detetor de ultrassom [12]	10
Figura 2.5 - Ondas longitudinais [12]	11
Figura 2.6 - Ondas transversais [13]	12
Figura 2.7 - Movimento das partículas durante a propagação das Ondas Rayleigh [10]	13
Figura 2.8 - Sistema de coordenadas para uma onda de Lamb num material sólido [14]	13
Figura 2.9 - Modos das ondas de Lamb [14]	14
Figura 2.10 - Diferenças entre o método convencional de técnicas de ultrassom e o LRUT [12]	15
Figura 2.11 - Geração de Ultrassons [12]	16
Figura 2.12 - Sonda direita duplo cristal [17]	17
Figura 2.13 - Esquema demonstrativo das diferenças entre técnicas de ultrassom que recorrem à piezoelectricidade e ao EMAT [19]	18
Figura 2.14 - Geração de ondas de ultrassom através de Forças de Lorentz [23]	19
Figura 3.1 - Equipamento de produção de raios-X (A) e raios gama (B) [9]	21
Figura 3.2 - Montagem experimental, (A) 1- Ponteira; 2- Tubo; 3- Equipamento de raios gama; (B) 4- Coque; 5- IQI; 6- Comparador; 7- Filme.	22
Figura 3.3 - Técnica DWSI (direita). Demonstração da espessura máxima de penetração (esquerda). 1 - Detetor ou filme radiográfico. [25]	23
Figura 3.4 - Radiografia utilizando comparadores. 1 - Detetor/filme. 2 - Projeção do comparador. “c” - Comparador [26]	24
Figura 3.5 - (A) - Radiografia Tangencial. (B) - Radiografia Tangencial com comparador. [26]	25
Figura 3.6 - HD-CR 35 NDT, leitor de detetores digitais.	25
Figura 3.7 - Densitómetro. 1- Ponteira responsável por medir densidade. 2- Ecrã com valores de densidades. 3- Botão de <i>reset</i>	26
Figura 3.8 - Negatoscópio. 1- Ecrã de leitura dos filmes. 2- Interruptor da fonte de luz e de energia. 3- Regulador da quantidade de luz.	26
Figura 3.9 - Extremidade com um terço de coque removido (A). Extremidade com um terço de coque e aço removido (B).	27
Figura 3.10 - Tubo com entalhe de dimensões 10x7 mm ²	27
Figura 3.11 - Sonda direita de duplo cristal 2 MHz.	28
Figura 3.12 - Padrão Aço-Carbono	28
Figura 3.13 - Fonte geradora de sinal.	29
Figura 3.14 - Sonda de EMAT. (1) - íman; (2) - <i>Encoder</i> ; (3) - Cabos que ligam à fonte.	29
Figura 3.15 - Padrão escada.	30
Figura 3.16 - <i>Set-up</i> de calibração. (1) – Interruptor; (2) – Padrão.	30
Figura 4.1 - Radiografia utilizando a técnica DWSI (direita) com SDD = 600 mm; 150 keV; 3 mA; 15 min.	32
Figura 4.2 - Radiografia utilizando a técnica DWSI com comparador e SDD = 600 mm; 170 keV; 3 mA; 15 min.	32
Figura 4.3 - Radiografia tangencial. SDD = 600 mm; 150 keV; 3 mA; 10 min.	33

Figura 4.4 - Radiografia ao tubo inalterado (cima). Radiografia ao tubo sem 1/3 da camada de aço e coque (baixo). SDD = 600 mm; 170 keV; 3 mA; 10 min.	33
Figura 4.5 - Radiografia Digital. SDD = 600 mm; 150 keV; 3 mA; 30 min.	34
Figura 4.6 - Radiografia Digital. SDD = 600 mm; 100 keV; 3 mA; 30 min.	34
Figura 4.7 - Radiografia convencional com o entalhe. SDD = 600 mm; 170 keV; 3 mA; 10 min.	35
Figura 4.8 - Radiografia digital com o entalhe. SDD = 600 mm; 100 keV; 3 mA; 30 min.	35
Figura 4.9 - Radiografia digital com a peça de chumbo. SDD = 600 mm; 100 keV; 3 mA; 30 min. ...	36
Figura 4.10 - Radiografia convencional com a peça de chumbo. SDD = 600 mm; 170 keV; 3 mA; 10 min.	36
Figura 4.11 - Radiografia com isótopo de Ir-192. SDD = 850 mm; 20 min.	37
Figura 4.12 - Radiografia com isótopo de Ir-192 à parede com elevada quantidade de oxidação. SDD = 850 mm; 20 min. (Camadas: Oxidação - vermelho; Aço - amarelo; Coque – azul)	38
Figura 4.13 - Colimador e Ponteira (A); Colimador (B); Ponteira (C).	38
Figura 4.14 - Radiografia com Ir-192 com comparador e IQI; SDD = 150 mm; 4 min.	39
Figura 4.15 - Radiografia com Ir-192 com comparador e IQI; SDD = 360 mm; 7:30 min.	40
Figura 4.16 - Radiografia com Ir-192 com comparador e IQI; SDD = 360 mm; 10 min.	40
Figura 4.17 - Radiografia com Se-75 com comparador e IQI; SDD = 360 mm; 20 min.	42
Figura 4.18 - Radiografia com Se-75 com comparador e IQI; SDD = 360 mm; 25 min.	42
Figura 4.19 - Radiografia digital com Se-75 com comparador e IQI; SDD = 360 mm; 7 min (cima) e 12 min (baixo).	43
Figura 4.20 - Calibração com o padrão aço-carbono.	44
Figura 4.21 - Amostra do tubo (1); Amostra de coque (2).	45
Figura 4.22 - Ultrassom com sonda direita duplo cristal de 2 MHz, numa amostra do tubo de aço.	45
Figura 4.23 - Ultrassom com sonda direita duplo cristal de 2 MHz, numa amostra de coque.	46
Figura 4.24 - Ultrassom com sonda direita duplo cristal de 2 MHz, numa zona do tubo sem coque e sem óxido.	46
Figura 4.25 - Ultrassom com sonda direita duplo cristal de 2 MHz, numa zona do tubo sem oxidação.	47
Figura 4.26 - Ultrassom com sonda direita duplo cristal de 2 MHz, em duas regiões do tubo de aço com elevada quantidade de oxidação.	48
Figura 4.27 - Sinal durante o teste com EMAT para a calibração do degrau 5.	49
Figura 4.28 - Sinal durante o teste com EMAT para região do tubo apenas com camada de aço.	49

Lista de Siglas

D.O. – Densidade Ótica

DWSI – Double Wall Single Image

EMAT – Electromagnetic Acoustic Transducer

END – Ensaio Não Destrutivo

IQI – Image Quality Indicators

LRUT – Long-Range Ultrasonic Testing

NDT – Nondestructive Testing

PDD – Pipe centre to Detector Distance

Pro – Valor provisório

SDD – Source to Detector Distance

TMT – Tube Metal Temperature

Motivação

O trabalho a realizar tem como principal objetivo o estudo e desenvolvimento de novas metodologias de inspeção não destrutivas de tubos que apresentem uma camada de coque no seu interior.

Um problema recorrente em diversos fornos de refinaria é a formação de camada de coque na superfície interna de tubos, geralmente em aços ferríticos dos tipos 5%Cr-0,5%Mo e 9%Cr-1%Mo, que ao apresentar uma baixa condutividade térmica resulta no isolamento do calor dentro do tubo, que por sua vez se traduz num aumento progressivo da temperatura do respetivo metal durante os ciclos de operação. Este facto promove uma degradação dos respetivos materiais por fenómenos de corrosão e de fluência.

A Galp colocou o desafio de desenvolver técnicas de controlo não destrutivo para pesquisa e medição de espessuras de camada de coque na superfície oposta à de abordagem, bem como uma estimativa da profundidade da parede afetada por fenómenos de difusão do carbono. Estas são uma enorme mais-valia para a otimização do planeamento das paragens pois, geralmente, são ações de manutenção preventivas (processos de descoqueificação).

Analisando as técnicas disponíveis para este tipo de estudos, a radiografia surge como uma das mais estudadas e utilizadas na medição das espessuras da camada de coque ao longo dos anos. A radiografia servirá como ponto de partida deste trabalho, sendo através desta possível obter-se um padrão de resultados. Tais resultados permitiram comparações e otimizações entre técnicas.

Considera-se que a técnica de ultrassons é bastante apropriada ao estudo das tubagens de fornos de refinaria já que, para além de não destrutiva, tem aplicações específicas para ambientes de elevadas temperaturas. Vão ser introduzidas técnicas como os ultrassons convencionais, mas também o EMAT, testando-se assim a fiabilidade destes ensaios e analisando qual se adequa à resolução deste problema.

1. Refinarias

A refinação de petróleo bruto em Portugal iniciou-se na década de 40, com a inauguração da refinaria da SACOR em Cabo Ruivo. Ao longo dos anos, a refinação tem vindo a assumir um papel importante no setor energético nacional, sendo o petróleo a principal fonte de energia utilizada atualmente.

Apesar do crescimento de alternativas energéticas, como o gás natural ou as energias renováveis, o petróleo ainda é a principal fonte de energia a nível nacional (Tabela 1.1).

Tabela 1.1 - Consumo de energia primária: total e por tipo de fonte de energia (dados adaptados da PORDATA)

Anos	Consumo de energia primária por tipo de fonte (tep (tonelada equivalente de petróleo) – Milhares)			
	Total	Petróleo	Gás natural	Energias renováveis
2010	23.102	11.241	4.507	5.321
2011	22.109	10.332	4.483	4.648
2012	21.482	9.297	3.950	4.395
2013	21.461	9.381	3.769	5.238
2014	20.921	9.089	3.486	5.409
2015	22.060	9.447	4.097	4.895
2016	21.684	9.157	4.340	5.568
2017	Pro 22.492	Pro 9.041	Pro 5.438	Pro 4.794

Os fornos tubulares são componentes chave dentro de uma refinaria. Durante o processo de refinação são responsáveis por fornecer calor ao fluido que atravessa uma serpentina de tubos. O calor tem origem na queima de combustível, sendo posteriormente transmitido por radiação, convecção e condução para o fluido. A importância que se dá a estes componentes deriva do facto de, atualmente, esta continuar a ser a forma mais eficaz de aquecer elevadas quantidades de fluido.

O forno tubular é responsável pela transferência de calor, sendo, por norma, necessário gerar uma quantidade de calor superior àquela estabelecida para cada processo devido à necessidade de compensar as perdas de energia. O processo de queima, responsável pelo fornecimento de calor, é causado pela combustão de combustível através de queimadores instalados na base ou nas paredes laterais da câmara de combustão do forno.

Os tubos, através dos quais se vai deslocar o fluido, são colocados junto às paredes laterais e ao teto da câmara, sendo o calor transferido tanto por radiação como por convecção [1].

1.1. Processos de degradação

Os processos de degradação dos fornos e dos respetivos tubos no seu interior são influenciados por diversos fatores como a composição do metal, a temperatura e o tempo de exposição. Existem formas de minimizar efeitos como a oxidação e coqueificação através da escolha de um material mais apropriado e das condições ideais para os equipamentos. Ainda assim, é inevitável a ocorrência de danos antes do normal período de vida de um tubo de forno de uma refinaria – aproximadamente 10 anos [2].

Ainda que existam várias formas de degradação, as mais recorrentes neste tipo de tubagens são a oxidação e a coqueificação. A oxidação é fortemente influenciada pela libertação dos compostos H_2O , CO_2 , CO , NO_2 e SO_2 , entre outros, durante a combustão do combustível.

1.1.1. Oxidação

O tempo de vida de um material exposto a elevadas temperaturas é significativamente reduzido por oxidação de alta temperatura, já que afeta as propriedades mecânicas destes materiais.

A oxidação é um fenómeno de corrosão que ocorre mais a elevadas temperaturas. A atmosfera dentro destes fornos é geralmente húmida, pois a elevadas temperaturas a água encontra-se em estado gasoso na forma de vapor.

A existência de dióxido de carbono (CO_2) e vapor de água (H_2O) traduzem-se num aumento da taxa de oxidação devido à formação de uma camada mais permeável, que por consequência leva ao aumento de oxidação na superfície externa dos tubos.

Também a presença de dióxido de enxofre (SO_2) aumenta a taxa de formação da camada mais permeável, resultando numa penetração intergranular do aço, que pode ser evitada com a introdução de um excesso de oxigénio livre [3] [4] [5].

1.1.2. Coqueificação

O petróleo consiste em hidrocarbonetos naturais, que podem apresentar diferentes complexidades moleculares e conter diversos compostos orgânicos. Os hidrocarbonetos são formados por átomos de Carbono e Hidrogénio ligados entre si, podendo apresentar-se sobre diversas formas (gasosa, líquida ou sólida), consoante as condições de pressão e temperatura [6].

O coque deriva da refinação do petróleo, desta forma a sua composição tem por base o Carbono e o Hidrogénio, tal como os hidrocarbonetos presentes no petróleo. O coque contém um teor elevado de Carbono e baixo de Hidrogénio, e apresenta uma baixa condutividade térmica, sendo considerado um isolador térmico. Este deriva da refinação de petróleo devido às condições nos tubos de choque ou radiantes, que levam à decomposição térmica do petróleo em coque e gás. As condições que proporcionam este processo de decomposição são a estabilidade inerente do petróleo, a sua alta temperatura e o elevado tempo de permanência dentro do tubo.

O coque depositado aumenta a temperatura do tubo de metal (TMT), sendo que, à medida que esta aumenta o processo de queima, deve ser reduzido para evitar atingir o limite crítico da TMT.

O *design* do sistema de aquecimento afeta a taxa de formação de coque através da sua influência na temperatura do petróleo e no tempo que o mesmo permanece dentro do tubo. No tubo de uma refinaria existem duas camadas de petróleo, uma mais externa que cobre as paredes do tubo e outra mais interna (Figura 1.1). Tanto a velocidade de deslocamento entre elas como a temperatura são diferentes. A camada mais externa, que cobre a parede interna do tubo, vai ter menor velocidade e uma diferença de temperatura de -3 °C a 90 °C em relação à temperatura da camada interna [7]. Tanto a baixa velocidade como as elevadas temperaturas levam à formação de coque.

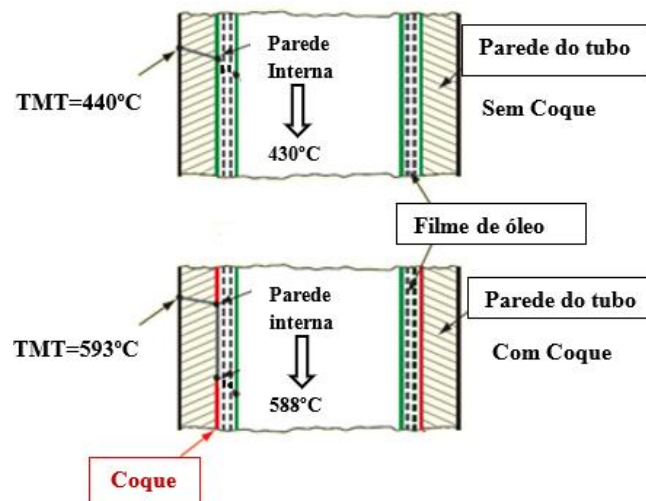


Figura 1.1 - Tubo sem Coque vs tubo com Coque [7]

Na Figura 1.2 verifica-se a relação entre a temperatura de pico, o tempo de permanência do petróleo e a formação de coque. Uma operação acima da linha de fissuração (linha azul) leva à formação de coque e de gás, que eventualmente conduz a “pontos” quentes. A estabilidade do petróleo move a linha para cima ou para baixo [7].

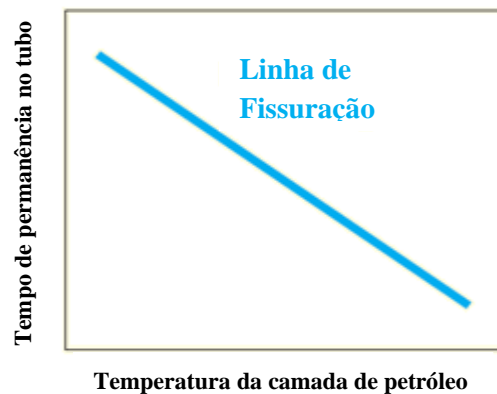


Figura 1.2 - Relação entre a temperatura da camada de petróleo e o tempo de permanência no tubo [7]

2. Ensaaios não destrutivos (END)

Os ensaios não destrutivos são tão antigos quanto a humanidade. Na pré-história, o Homem já utilizava produtos padrão, que considerava em boas condições e comparava-os com outros. Exemplo disso era a carne, que através do seu cheiro era feita a comparação entre uma carne fresca e outra potencialmente estragada. Hoje em dia, ainda que bastante mais evoluído, utilizam-se os mesmos processos de comparação.

O desenvolvimento dos END, como hoje conhecemos, tem origem no século XIX, quando as empresas iniciam um processo de controlo do estado dos seus produtos. No entanto, é durante as duas guerras mundiais que estes tipos de técnicas de inspeção proliferam, devido à necessidade de aproveitar todo o tipo de armas e materiais que, ainda que inoperacionais, podiam servir outros propósitos.

Os END são processos de inspeção, testes e/ou avaliações de materiais sem causar quaisquer alterações de nível funcional ou estrutural do sistema em análise, permitindo assim realizar vários testes no objeto em estudo. Apesar de os END não serem as mais apropriadas para o estudo das propriedades físicas dos materiais, como resistência a impactos, fraturas ou ductilidade, são as mais eficientes na medição de espessuras, estudo de descontinuidades e diferenças nas características do material.

Atualmente os END são utilizadas em várias indústrias como as do petróleo, nuclear, alimentar e farmacêutica no controlo dos processos de fabricação, i.e., otimização de processos que resultam num aumento de qualidade dos materiais, na redução de custos e uniformização da produção. Os END são ainda utilizadas em inspeções militares, sendo possível garantir a integridade e a confiabilidade dos materiais a inspecionar, como servem de exemplo os explosivos, o armamento e os mísseis.

Existem várias técnicas disponíveis para a análise da estrutura interna de tubos de refinarias, mas há duas que se destacam, o Ultrassom e a Radiografia, sendo estes capazes de detetar descontinuidades com elevada sensibilidade e com poucos milímetros de extensão [8] [9].

2.1. Radiografia Industrial

A radiografia industrial utiliza raios-X, raios gama, neutrões e outras radiações penetrantes para examinar a estrutura interna e a integridade do equipamento. Após irradiar uma peça, a imagem é obtida através de uma película radiográfica ou de um detetor digital, que pode ser utilizada para detetar e medir a densidade do material (as variações nas densidades apresentam-se como descontinuidades ou falhas no material em estudo).

Para que seja possível estudar peças mais complexas é necessário utilizar uma quantidade variável de radiação e, desta forma, determinar as espessuras exatas e descontinuidades no material. A espessura e densidade do material vão ter influência no tipo de exame que se utiliza: os raios-X no caso de materiais mais finos e menos densos, e raios gama para os materiais mais espessos e densos.

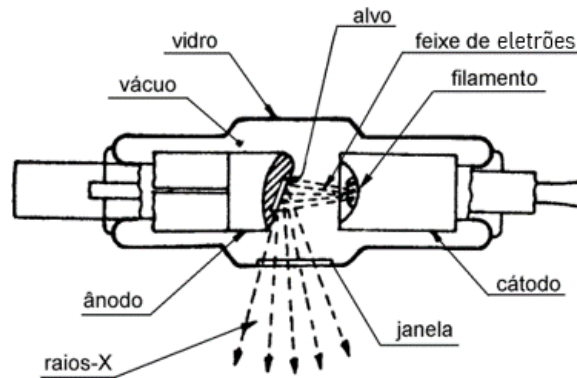


Figura 2.1 - Esquema ilustrativo de um tubo de raios-X [10]

A radiação X é eletromagnética e composta por raios-X, tendo um comprimento de onda entre 0.01nm e 10nm. É também designada por radiação de Bremsstrahlung (colisão) e tipicamente gerada num tubo em vácuo composto por um ânodo e um cátodo. Devido à distância entre o cátodo e o ânodo é necessário a existência de vácuo. Caso contrário, não seria possível evitar a absorção dos elétrons produzidos pelo próprio ar, que levariam à degradação da taxa de dose.

No cátodo os elétrons são produzidos pelo aquecimento de um filamento, mediante a aplicação de uma corrente elétrica. Os elétrons livres são libertados pelo cátodo e acelerados por uma elevada diferença de potencial (centenas de kilovolts), aplicada entre o cátodo e o ânodo.

O potencial negativo tem de ser aplicado no cátodo, de forma a que os elétrons, com carga negativa, sejam acelerados na direção do ânodo.

O ânodo é geralmente construído num metal com boa resistência a altas temperaturas e elevado número atômico, levando a que o efeito de desaceleração seja maior e, consequentemente, a produção de raios X também o seja. Dadas estas características, o tungsténio é um material bastante utilizado na construção dos alvos.

Ao colidirem com o alvo de metal, vão transformar grande parte da sua energia cinética em calor (cerca de 99%), sendo o remanescente transformado em radiação X. Este processo deve-se à rápida desaceleração dos elétrons, que ao interagirem com o núcleo dos átomos do alvo, geram raios-X. O pequeno comprimento de onda que estes possuem torna-os capazes de penetrar e se deslocar através de estruturas de materiais como o aço e as ligas metálicas [9].

2.1.1. Radiografia convencional

A radiografia convencional é um END que utiliza películas radiográficas, estando estas diretamente alinhadas com a fonte e colocadas do lado oposto à zona a irradiar no objeto. A radiação vai penetrar o objeto em estudo e por consequência vai também penetrar a película, que irá apresentar tons de cinza. As áreas mais escuras indiciam a existência de uma maior exposição a radiação, i.e., na película a zona mais escura é indicativa de que o material tem um defeito, como é o exemplo das fendas. Contrariamente ao que acontece nas áreas escuras, as áreas mais claras demonstram a inexistência de fendas, pois a espessura do material absorve grande parte dos fotões emitidos pela fonte raio-X [9].

Na Figura 2.2 é possível observar os diferentes tons de cinza no filme radiográfico quando a radiação penetra o objeto em estudo. Neste caso, os diferentes tons de cinza devem-se à existência de uma região de descontinuidade, uma fissura, que reflete uma zona com menor espessura e em tons de cinza mais escuros.

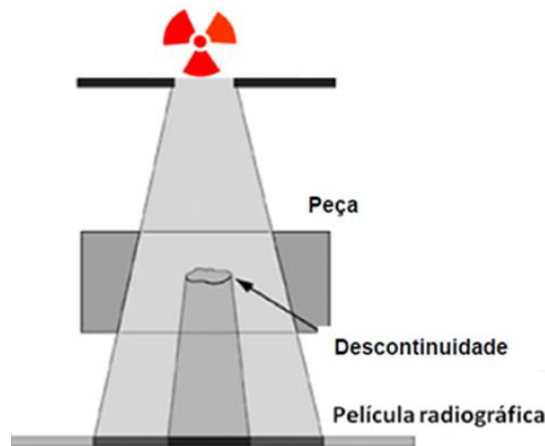


Figura 2.2 - Radiografia industrial convencional [9]

2.1.2. Radiografia Digital

A radiografia digital tem o mesmo método de geração de raios-X que a radiografia convencional, alterando apenas o suporte onde tem lugar a formação da imagem. Ao invés dos filmes utilizados na radiografia convencional, neste caso utilizam-se detetores digitais que são excitados pela ação da radiação. Ao contrário dos filmes, os detetores podem ser reutilizados inúmeras vezes e a imagem é armazenada em formato digital. A análise entre as técnicas também difere, pois na radiografia digital utiliza-se um *software* que permite analisar e modificar as propriedades da imagem conforme seja mais apropriado.

2.2. Ultrassons

O ouvido humano é apenas sensível aos sons com frequências compreendidas no intervalo de 500-3000 Hz. Quando a frequência é superior aquela que o ouvido Humano consegue captar, denomina-se ultrassom. As propriedades físicas de ondas ultrassom não são diferentes daquelas audíveis ao ouvido, apenas é impossível ouvi-las, tendo um intervalo que vai dos 20 kHz até alguns GHz de frequência.

Os ensaios de ultrassom consistem em introduzir, no material a analisar, uma onda elástica e observar a sua reflexão. Esta pode ocorrer tanto sobre a parede de fundo da peça como em qualquer descontinuidade interna. Ao analisar estas reflexões, conhecidas como ecos, é possível obter informação sobre o local da descontinuidade e o seu tamanho.

O som, como todas as ondas, é definido pela frequência e pela amplitude. A sua geração deve-se a uma vibração mecânica de partículas num meio elástico, seja sólido, líquido ou gasoso. O meio é necessário para permitir a transmissão de energia sem que haja troca de matéria.

A propagação do som é feita na forma de uma onda sonora a partir de um objeto vibratório. Estas ondas têm velocidades de propagação diferentes consoante o meio em que se encontram, sendo mais rápidas no meio sólido, seguindo-se o líquido e, por fim, mais lentas no meio gasoso.

A amplitude da onda relaciona-se com o nível de pressão sonora, que determina a intensidade do som. Esta grandeza é medida em Pascal (Pa) e (N/m²); no entanto, em ensaios de ultrassom, os valores são expressos em decibéis (dB).

Na Figura 2.3 é possível observar duas situações distintas: a inexistência e a existência de uma descontinuidade. No caso da inexistência, pode observar-se o sinal inicial e o respetivo eco de fundo, ao

passo que no caso em que existe descontinuidade, é visível o aparecimento de um novo eco mais próximo do sinal original. O novo eco, com menor amplitude, deve-se à reflexão de parte do sinal, aquando da passagem pela descontinuidade. A porção de onda transmitida reflete na parede de fundo do material, produzindo o eco de fundo esperado [12].

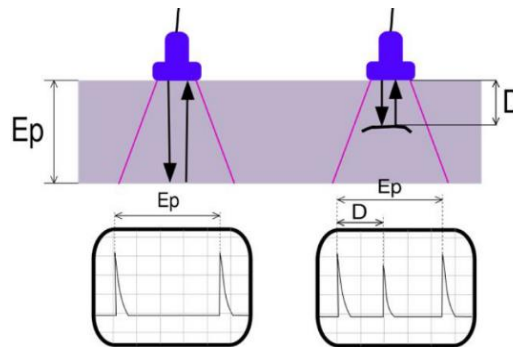


Figura 2.3 - Exemplo material sem fenda (esquerda) e com fenda (direita) [12]

É possível distinguir um eco de fundo de um eco produzido por uma descontinuidade: como é possível observar na Figura 2.3, surge um eco entre o eco inicial e o eco de fundo. Quando isto acontece é facilmente perceptível que o novo eco tem origem numa descontinuidade, porque a sua amplitude é inferior à do eco de fundo. Uma representação gráfica deste acontecimento na Figura 2.4 tem no eixo Ox a distância a que se deu o eco e no eixo Oy a percentagem correspondente à amplitude em decibéis.

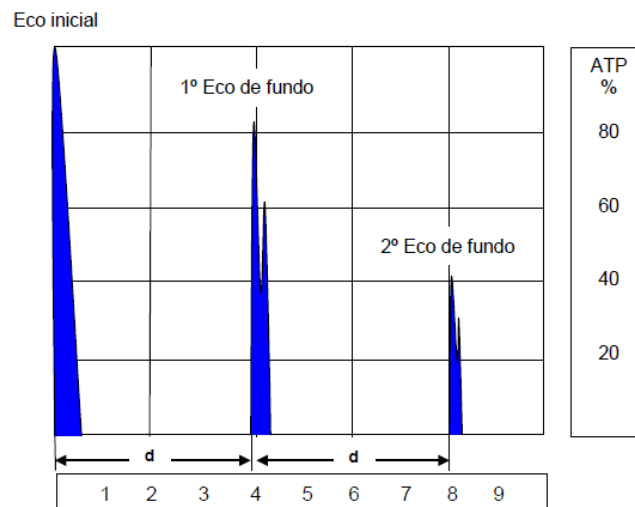


Figura 2.4 - Representação simplificada do leitor de um detetor de ultrassom [12]

Através do tempo de voo, i.e., intervalo entre a libertação da onda e a deteção da sua reflexão, é possível obter a distância através de:

$$v = \frac{d}{t} \quad (2.1)$$

Uma vez que a velocidade de propagação do som no material é tabelada e é medido o tempo de voo. Por consequência, obtém-se o valor de d que representa a espessura da peça ou a profundidade a que se encontra o defeito.

2.2.1. Tipos de Ondas

No ultrassom existem dois tipos de onda: contínuas e por impulsos. A formação de uma ou outra é influenciada por perturbações mecânicas, pois estas podem ser contínuas ou por impulsos.

Os vários modos de propagação de onda baseiam-se na relação entre a direção de propagação da onda e a direção do movimento das partículas do meio elástico. As ondas podem então ser longitudinais, transversais, Lamb e Rayleigh.

2.2.1.1. Ondas Longitudinais

Como os gases não suportam forças de corte, as ondas transversais são desconsideradas e o som propaga-se apenas longitudinalmente.

As ondas longitudinais, também conhecidas como ondas de compressão, são produzidas quando a direção de vibração das partículas é a mesma que a direção de propagação do som.



Figura 2.5 - Ondas longitudinais [12]

Apesar destas ondas se propagarem em todos os meios, a velocidade de propagação depende do meio. Como a onda varia ao longo do tempo através de compressões e rarefações, o movimento, no caso de meios gasosos, depende do módulo em volume, B , do gás e da densidade ρ . Sendo a velocidade c desta onda expressa por [12]:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{p}{\rho}} \gamma \quad (2.2)$$

onde p é a pressão do gás e γ o índice adiabático.

Contudo, a expressão para ondas longitudinais em sólidos isotrópicos é ligeiramente diferente, uma vez que o B é substituído pelo módulo de Young, E . O coeficiente de Poisson, μ , influencia ainda o valor da velocidade longitudinal [12].

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (2.3)$$

2.2.1.2. Ondas Transversais

As ondas transversais, também conhecidas como ondas de corte, são produzidas quando a direção de vibração das partículas é perpendicular à direção de propagação do som.



Figura 2.6 - Ondas transversais [13]

Estas conseguem propagar-se no meio sólido, uma vez que os sólidos são capazes de suportar forças de corte, ao contrário do que acontece nos gases. Porém, a expressão da velocidade é diferente, já que o módulo de Young, E , é substituído pelo módulo de elasticidade transversal do material, G .

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.4)$$

A sua velocidade de propagação é de aproximadamente metade da velocidade das ondas longitudinais no meio sólido [12][14].

2.2.1.3. Ondas Rayleigh

Estas ondas distinguem-se pela propagação à superfície de meios elásticos, denominando-se por vezes de ondas superficiais. A sua propagação contém movimentos longitudinais e transversais, que diminuem exponencialmente, em amplitude, à medida que a profundidade aumenta. Quando estas ondas se propagam na direção do eixo do x , são independentes em y e têm uma componente longitudinal u e transversal w .

$$u = A (re^{-qz} - 2sqe^{-sz}) \cos k (x - ct) \quad (2.5)$$

$$w = A q (re^{-qz} - 2e^{-sz}) \sin k (x - ct) \quad (2.6)$$

Onde A é a amplitude, λ é o comprimento de onda, k é o número de onda dado por (2.7) e q , s e r são dados, respetivamente, por (2.8), (2.9) e (2.10).

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.7)$$

$$q = \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_L}\right)^2} \quad (2.8)$$

$$s = \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_T}\right)^2} \quad (2.9)$$

$$r = 2 - \left(\frac{c}{c_T}\right)^2 \quad (2.10)$$

Recorrendo às expressões (2.5) e (2.6) é possível observar que u e w decaem exponencialmente com z devido aos termos e^{-sz} e e^{-qz} .

A uma distância de um comprimento de onda abaixo da superfície, a amplitude é de aproximadamente 10% em relação à amplitude inicial. Analisando ainda as expressões, u e w são respectivamente cosseno e seno, logo a propagação das partículas do material será efetuado em elipse [14] [15].

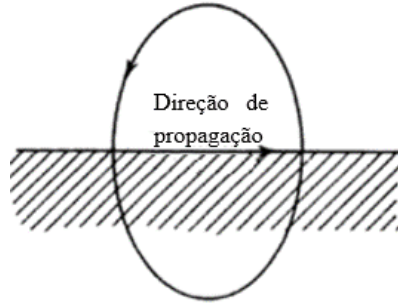


Figura 2.7 - Movimento das partículas durante a propagação das Ondas Rayleigh [10]

Em sólidos isotrópicos, a propagação destas ondas leva ao movimento elíptico das partículas em planos normais à superfície e paralelos à direção de propagação. A velocidade de propagação destas ondas corresponde geralmente a 90% da velocidade da onda transversal, sendo a sua expressão dada por:

$$c_S = 0.9 \times c_T \quad (2.11)$$

A amplitude da onda decai com a distância devido à propagação da energia ao longo de uma frente de onda crescente. Nas ondas Rayleigh, que não penetram significativamente o volume do material, a amplitude escala com a distância radial, R , por $1/\sqrt{R}$ [14] [15].

2.2.1.4. Ondas Lamb

São ondas elásticas que se propagam num meio sólido limitado por dois planos paralelos a uma distância de $2d$ um do outro. A análise das equações de Lamb derivam de um caso em que, uma placa sólida com extensão infinita na direção do eixo do x e y e com espessura d no eixo do z . Ao assumir que a direção de propagação das ondas é x , a análise destas ondas é simplificada [14].

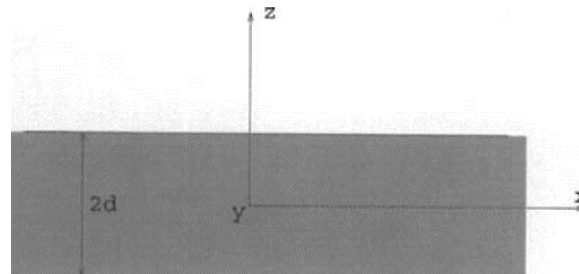


Figura 2.8 - Sistema de coordenadas para uma onda de Lamb num material sólido [14]

Existem dois tipos de modos, simétrico e assimétricos. Para ondas simétricas o deslocamento do plano u é uma função par de z , $u(z) = u(-z)$. As ondas assimétricas têm u como uma função ímpar de z , $u(-z) = -u(z)$.

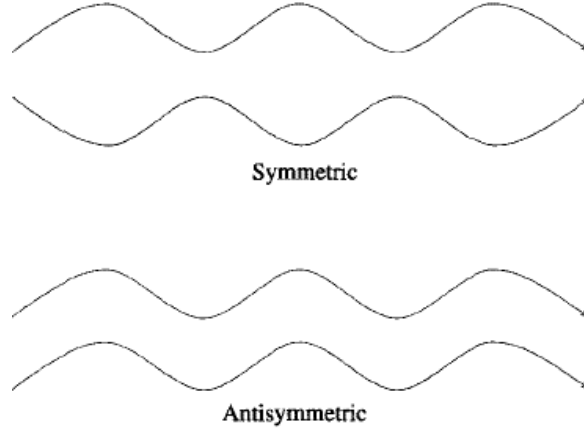


Figura 2.9 - Modos das ondas de Lamb [14]

As equações de propagação das ondas de Lamb são dadas pelas expressões (2.12) e (2.13) para o modo simétrico e (2.14) e (2.15) para o modo assimétrico.

$$u = (ikA \cos(pz) + qB \cos(qz))e^{ik(x-ct)} \quad (2.12)$$

$$w = (-pA \sin(pz) - ikB \sin(qz))e^{ik(x-ct)} \quad (2.13)$$

$$u = (ikC \sin(pz) - qD \sin(qz))e^{ik(x-ct)} \quad (2.14)$$

$$w = (pC \cos(pz) - ikD \cos(qz))e^{ik(x-ct)} \quad (2.15)$$

Onde A, B, C, D são constantes arbitrárias, p e q definidas como (2.16) e (2.17):

$$p = \frac{w}{\sqrt{c_L^2 - c^2}} \quad (2.16)$$

$$q = \frac{w}{\sqrt{c_T^2 - c^2}} \quad (2.17)$$

Se forem estabelecidas condições de fronteira tais que, $\sigma_{xy} = \sigma_{zz} = 0$ para $z = \pm \frac{d}{2}$, serão encontradas duas novas expressões.

$$\text{Simétrico} \quad \frac{\tan qd}{\tan pd} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (2.18)$$

$$\text{Assimétrico} \quad \frac{\tan pd}{\tan qd} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (2.19)$$

Estabelecendo um valor de frequência w , as expressões (2.18) e (2.19) irão especificar os valores permitidos da velocidade c . Sabe-se ainda que a velocidade c depende do valor de w e d , pois estas duas variáveis apenas entram nas equações (2.18) e (2.19) como produtos. Dependendo do valor de w e d , as

equações (2.18) e (2.19) podem ter qualquer quantidade de soluções reais. As formas de onda correspondentes às diferentes velocidades de onda permitidas são denominadas de modos. Os modos estão separados, como mencionado anteriormente, em simétricos e assimétricos, e aumentam com o aumento de w e d .

Para baixas frequências, abaixo de determinado limite, apenas existe um modo simétrico e um assimétrico, que são denominados, respectivamente, de S_0 e A_0 .

A possibilidade de existirem vários modos gera um problema prático caso estas ondas sejam aplicadas em ensaio não destrutivo. Uma propagação de vários modos dificulta a identificação da origem da informação, i.e., será difícil diferenciar e identificar o modo que forneceu determinada informação. Cada modo tem uma velocidade de propagação diferente, logo as reflexões provenientes de descontinuidades serão detetadas em tempos diferentes, gerando um conflito de dados. É então necessário utilizar um transdutor para excitar apenas o comprimento de onda desejado de forma a haver apenas um modo [14].

2.2.1.5. Ondas Guiadas

A inspeção por ondas guiadas ou LRUT é um tipo de END não convencional utilizado para a detecção de perdas de material em tubagens. Na Figura 2.10 observa-se a diferença entre os ultrassons convencionais e a LRUT. Nas técnicas de ultrassom convencionais a inspeção é realizada apenas com uma sonda, sendo uma inspeção localizada. Nas LRUT é utilizado um anel de transdutores, que emitem ondas ultrassom de baixa frequência e que, por sua vez, se propagam para ambos os lados do tubo, sendo possível inspecionar grandes distâncias do tubo a partir de um ponto de aplicação apenas [12].

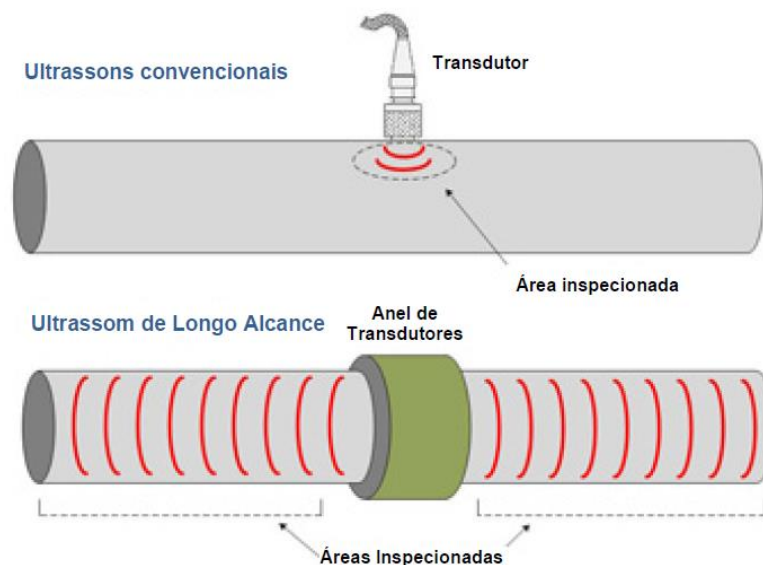


Figura 2.10 - Diferenças entre o método convencional de técnicas de ultrassom e o LRUT [12]

Os ultrassons de ondas guiadas baseiam-se na geração de ondas de Lamb, com frequências no espectro dos kHz e propagam-se em conformidade com a interação das ondas de superfície geradas pelas reflexões de um feixe de ultrassom nas paredes do tubo.

Uma das muitas aplicações que este tipo de ondas pode ter é a inspeção de aço incrustado em betão. Através das ondas guiadas é possível enviar energia ultrassônica ao longo das placas de aço com uma pequena fuga no betão, permitindo a localização de corrosão e de fissuras nas placas de aço. Para esta aplicação utilizam-se ondas de corte horizontal EMAT [12].

2.2.2. Sondas Piezoelétricas

Nas sondas, o transdutor é um elemento fundamental, pois é este que converte os impulsos elétricos de alta frequência em impulsos mecânicos que dão origem às vibrações sonoras introduzidas nas peças a inspecionar.

A piezoelectricidade é uma componente essencial no estudo de materiais com base em ondas de ultrassons através da qual determinados cristais, quando submetidos a tensões mecânicas, adquirem uma polarização elétrica na sua massa, dando origem a uma diferença de potencial e cargas elétricas na sua superfície (receção de ultrassons). O inverso também pode ocorrer, ou seja, quando submetidos a campos elétricos, por efeito das forças internas geradas, sofrem deformações mecânicas (geração de ultrassons).

Então, quando se aplica uma diferença de potencial entre as superfícies de um sólido que apresenta o efeito piezoelétrico, este vai sofrer uma deformação mecânica.

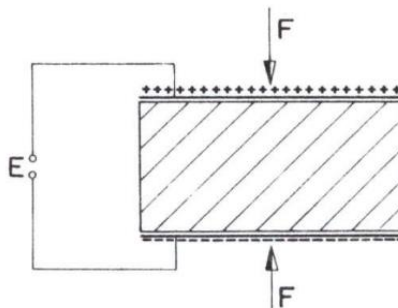


Figura 2.11 - Geração de Ultrassons [12]

2.2.2.1. Sondas direitas

Existem diferentes tipos de sondas nos ensaios de ultrassom, entre as quais se encontram as sondas direitas e as angulares.

Nas sondas direitas o som é introduzido numa direção perpendicular à sua superfície, produzindo desta forma ondas longitudinais. Estas podem ainda conter cristal único ou cristal múltiplo. No primeiro caso, o cristal funciona como emissor e recetor. Já nos múltiplos, os processos de emissão e receção são efetuados por diferentes transdutores. As últimas serão o tipo de sondas utilizadas durante o decorrer dos ensaios.

As sondas são ainda constituídas por outro elemento muito importante, o amortecimento. Caso a sonda seja altamente amortecida, terá largura de banda e resolução maiores; todavia, o som é pouco penetrante. No caso em que o amortecimento é reduzido, a largura de banda diminui e consequentemente também a resolução, mas, em contrapartida, o som é mais penetrante [16].

As sondas direitas de múltiplo cristal podem ainda ser consideradas de contacto ou de imersão, sendo que nas sondas de contacto o acoplamento é feito com uma camada extremamente fina de aco-plante.

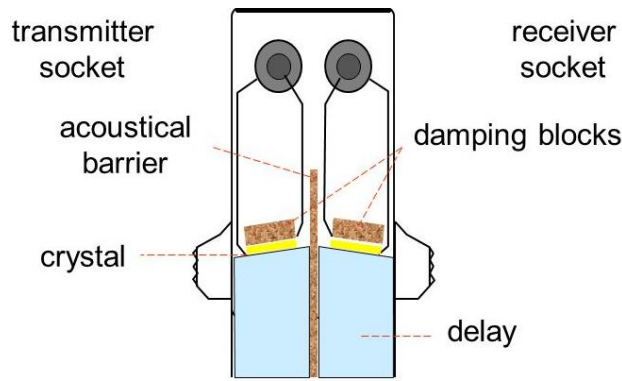


Figura 2.12 - Sonda direita duplo cristal [17]

2.2.3. Magnetostricção

O efeito magnetostritivo baseia-se em fenómenos de mudança da dimensão física em materiais ferromagnéticos que ocorre através de variações na magnetização. A geração e deteção de ondas mecânicas são realizadas através da introdução de uma corrente de pulso numa bobine adjacente a um material ferromagnético. A bobine pode funcionar tanto para transmitir como para detetar as ondas mecânicas.

A mudança na magnetização dentro do material leva-o a alterar as suas dimensões numa direção paralela ao campo aplicado. Esta mudança de dimensão abrupta – o efeito magnetostritivo – gera uma onda mecânica, designada por onda guiada, que se propaga através do material ferromagnético com determinada velocidade.

A onda mecânica, ao ser refletida de volta pelo fim do material ou por um defeito, vai incidir na bobine de deteção, resultando na geração de um fluxo magnético variável. A este fenómeno chama-se magnetostricção inversa. Este fluxo magnético induz uma tensão elétrica dentro da bobine que é proporcional à magnitude da onda mecânica [18].

2.2.4. EMAT

Transdutor acústico eletromagnético ou EMAT é uma técnica de ultrassons que gera ondas em materiais condutores. A geração e a deteção de ondas guiadas têm por base mecanismos como a força de Lorentz e a magnetostricção em materiais ferromagnéticos.

O EMAT consiste numa bobine responsável pela indução de uma corrente de Eddy e num íman que estabelece um campo magnético estático. Ao contrário do que ocorre nas restantes técnicas de ultrassom, utiliza um íman em vez de um cristal, não estando em contato com a amostra, i.e., não é necessário acoplar a sonda ao material.

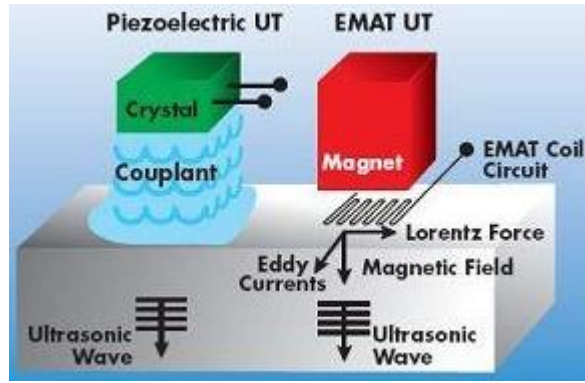


Figura 2.13 - Esquema demonstrativo das diferenças entre técnicas de ultrassom que recorrem à piezoelectricidade e ao EMAT [19]

O não acoplamento está na gênese das suas vantagens, sendo ideal tanto para o estudo da espessura de materiais quentes e frios como para inspeções em serviço de tubos, tubagens, caldeiras, tanques, entre outros. A ausência de acoplamento melhora a fiabilidade do processo de exploração, reduzindo o risco de perda por acoplamento indevido presente nos estudos por contacto.

No entanto, não é possível aplicar altas frequências e é necessário existir proximidade entre a sonda e o objeto, dado que o acoplamento é dependente do afastamento (*lift-off*) entre a sonda e a peça, sendo por isso importante manter a sonda o mais próximo possível da peça, cerca de 1 mm [12] [20].

2.2.4.1. EMAT através de força de Lorentz

O EMAT convencional para ondas de Lamb funciona com forças de Lorentz. Uma corrente, I atravessa a bobine, levando à produção de um campo magnético dinâmico, H , que varia ao longo do tempo e espaço. A densidade de corrente de Eddy, dada por:

$$J = \nabla \times H \quad (2.20)$$

e pelas equações de Maxwell para condições quase estáticas, é gerada na superfície do metal. Esta corrente interage, posteriormente, com um campo magnético estático induzido, B , produzindo assim a densidade da força de Lorentz [20] [21] [22].

$$F = J \times B \quad (2.21)$$

Esta força causa perturbações elásticas que são transferidas para a rede do material e estão na origem das ondas acústicas. As ondas de Lamb propagam-se perpendicularmente à bobine. Durante a deteção do sinal ocorre o inverso do processo anteriormente descrito [20] [21].

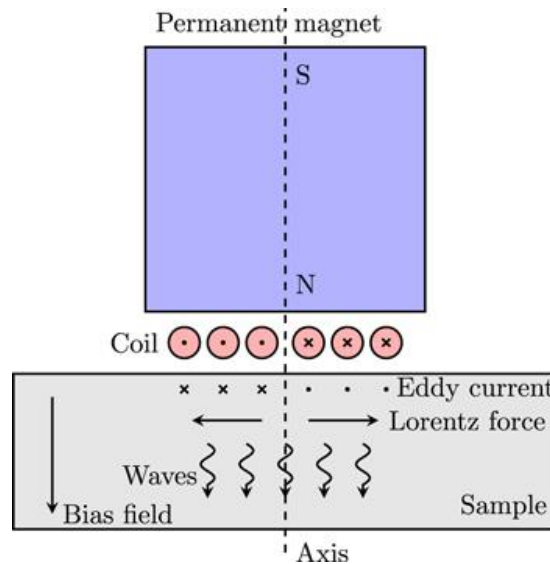


Figura 2.14 - Geração de ondas de ultrassom através de Forças de Lorentz [23]

2.2.4.2. EMAT através da magnetostricção

Um mecanismo magnetostritivo pode funcionar enquanto força para materiais ferromagnéticos.

A magnetostricção baseia-se no alinhamento de domínios devido à existência de um campo magnético aplicado, alinhamento que leva a mudanças dimensionais. O campo magnético induzido pela bobine resulta na magnetostricção e em vibrações mecânicas.

Quando o campo magnético e o campo estático, induzido pelo íman, são aplicados paralelamente à peça, a força do campo magnético combinado altera-se. Isto produz padrões periódicos de deformações de tração e compressão na peça, resultando em ondas de Lamb. O processo de detecção de ondas será o inverso ao de geração anteriormente descrito [22] [24].

3. Equipamentos e Métodos

Neste capítulo pretende dar-se uma breve apresentação dos materiais que foram utilizados no decorrer dos ensaios não destrutivos para o caso da Radiografia e do Ultrassom, e os métodos adotados na realização desses ensaios, descrevendo ainda as alterações realizadas no tubo para que fosse possível estabelecer meios de comparação de forma a confirmar ou a rejeitar algumas das interpretações presentes nos resultados obtidos.

Numa primeira fase, vão ser abordados ensaios radiográficos convencionais e digitais realizados nas instalações do ISQ, entre abril e maio, com o apoio do Eng. David Alface, do Eng. José Sousa e do Eng. José Manuel Velhinho.

A segunda fase dará a conhecer os ensaios de ultrassom convencionais e EMAT, também realizados nas instalações do ISQ, entre junho e julho, com o apoio do Eng. David Alface e do Eng. José Sousa.

3.1. Radiografia Industrial (Equipamento)

As instalações do ISQ são capacitadas de um *bunker* onde são realizados diferentes tipos de testes. Estes podem ser realizados em vários materiais e têm como objetivo averiguar a fiabilidade dos materiais em inspeção. Neste trabalho foi utilizada uma fonte de raios-X com 170 keV de energia máxima e dois isótopos responsáveis pela radiação gama, o Iridio-192 e o Selénio-75.

O estudo da espessura da camada de coque foi realizado conforme algumas normas de radiografia, entre as quais a ISO 17636-1, que aborda as técnicas mais gerais de radiografia, e as ISO 20769-1 e ISO 20769-2, que tratam técnicas focadas na medição da espessura de paredes tubulares.

As técnicas que serão descritas em seguida foram repetidas para a radiografia convencional e para a radiografia digital utilizando raios-X e raios gama. Estas técnicas diferem não só no modo de captação e revelação de imagem, mas também no tipo de radiação e na maneira de aplicar a mesma.



Figura 3.1 - Equipamento de produção de raios-X (A) e raios gama (B) [9]

3.1.1. Isótopos

Os isótopos utilizados foram o Irídio-192 e o Selénio-75, sendo o irídio o isótopo ideal para uma espessura máxima atravessada com valores entre 55 e 80 mm. Contudo, o irídio é um isótopo muito radioativo e a sua utilização em obra pode tornar-se complicada. Por isso testou-se o selénio, que é aproximadamente duas vezes menos radioativo do que o irídio.

Os aparelhos utilizados nos raios gama diferem um pouco daqueles utilizados nos raios-X. Enquanto o processo nos raios-X é elétrico, o processo de exposição por raios gama consiste em retirar o isótopo do interior de um equipamento isolador, composto por urânio, até que o isótopo se encontre na ponteira do equipamento.

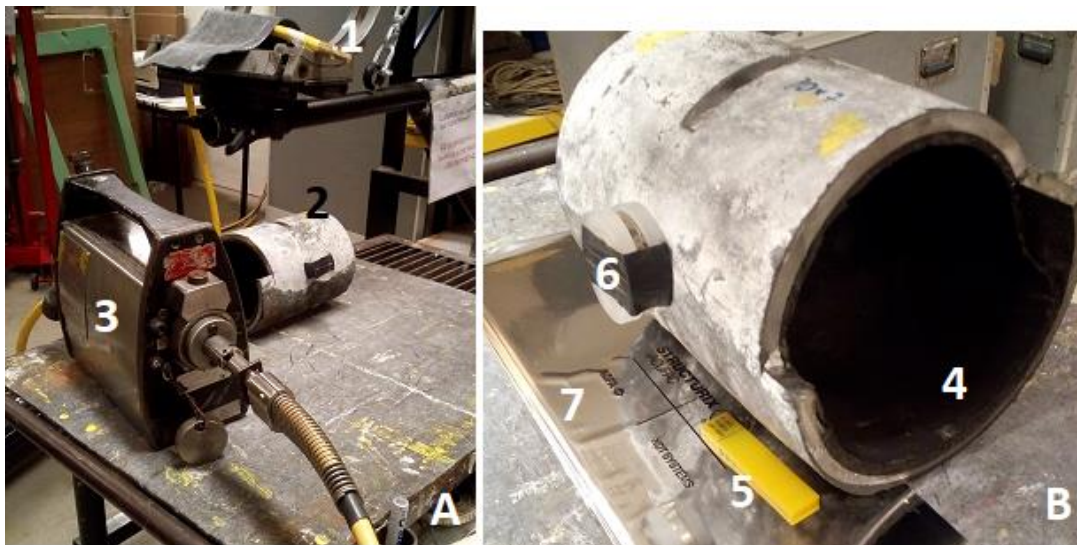


Figura 3.2 - Montagem experimental, (A) 1- Ponteira; 2- Tubo; 3- Equipamento de raios gama; (B) 4- Coque; 5- IQI; 6- Comparador; 7- Filme.

Mas para que seja possível utilizar estes isótopos em inspeções, é necessário otimizar o processo de radiografia. Com esse propósito, foram realizados vários ensaios de forma a obter a melhor relação entre tempo de exposição e qualidade de imagem, tendo sido ainda necessário limitar a quantidade de radiação dispersa.

3.2. Técnicas Radiográficas

A técnica *Double Wall Single Image* ou DWSI, que pode ser encontrada na norma ISO 20769-2, é utilizada para tubos com diâmetro superior a 150 mm. É necessário calcular SDD, que é a distância a que a fonte deve estar do filme/detector, estando expressa na norma para esta técnica, da seguinte forma.

$$SDD \geq \frac{d \times PDD}{0.6 \text{ mm}} \quad (3.1)$$

Onde PDD é a distância entre o centro do tubo e o detector/filme e d é o tamanho da fonte. Para esta técnica é ainda necessário calcular o w_{max} que representa a espessura máxima de penetração.

$$w_{max} = 2 \times \sqrt{t(D_e - t)} \quad (3.2)$$

D_e é dado como o diâmetro exterior do tubo e t é a espessura nominal do tubo. Através do w_{max} determinado recorre-se a uma tabela presente na norma ISO 20769-1 e obtém-se a quantidade ideal de radiação a utilizar para este estudo.

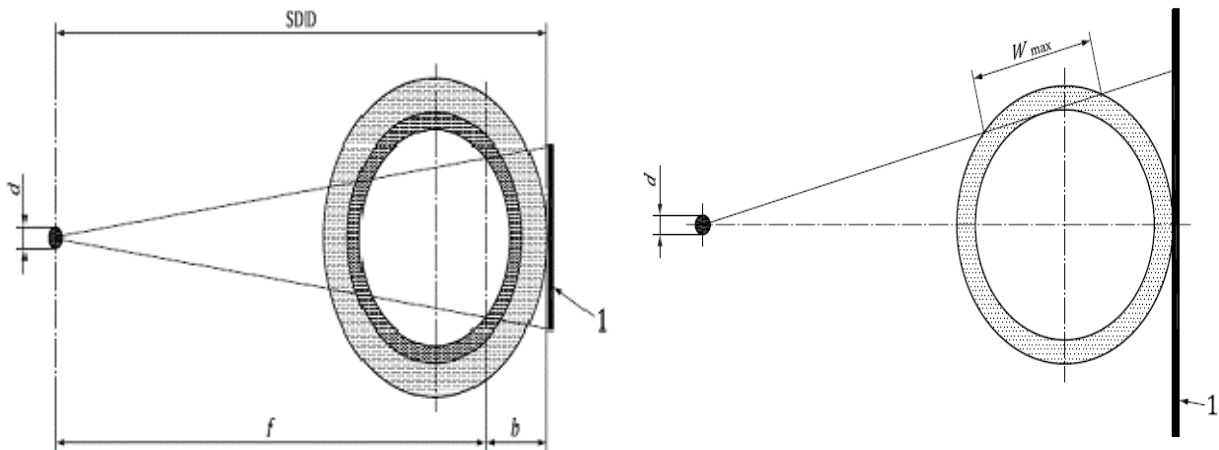


Figura 3.3 - Técnica DWSI (direita). Demonstração da espessura máxima de penetração (esquerda).

1 - Detetor ou filme radiográfico. [25]

3.2.1. Comparador Dimensional

A norma ISO 20769-1 refere uma técnica que recorre a comparadores para medir a espessura da parede tubular. Nesta técnica utiliza-se um comparador que é colocado o mais próximo possível da parede do tubo, sem que exista contacto entre as duas superfícies.

Este comparador é utilizado já que a espessura da parede do tubo representada no filme não é a espessura real do tubo, i.e., há um fator multiplicativo associado a esta medida, devido à dificuldade de a fonte estar completamente alinhada com o tubo. Sabendo à partida a espessura original do comparador, utiliza-se então um coeficiente de proporcionalidade, entre a espessura real do comparador e as espessuras do comparador e da parede do tubo expressas no filme/detector (Figura 3.4).

Pode ainda ser necessário realizar vários ensaios até que se atinja uma qualidade da imagem (resolução) que permita observar com clareza as diferentes camadas do tubo e as respectivas espessuras.

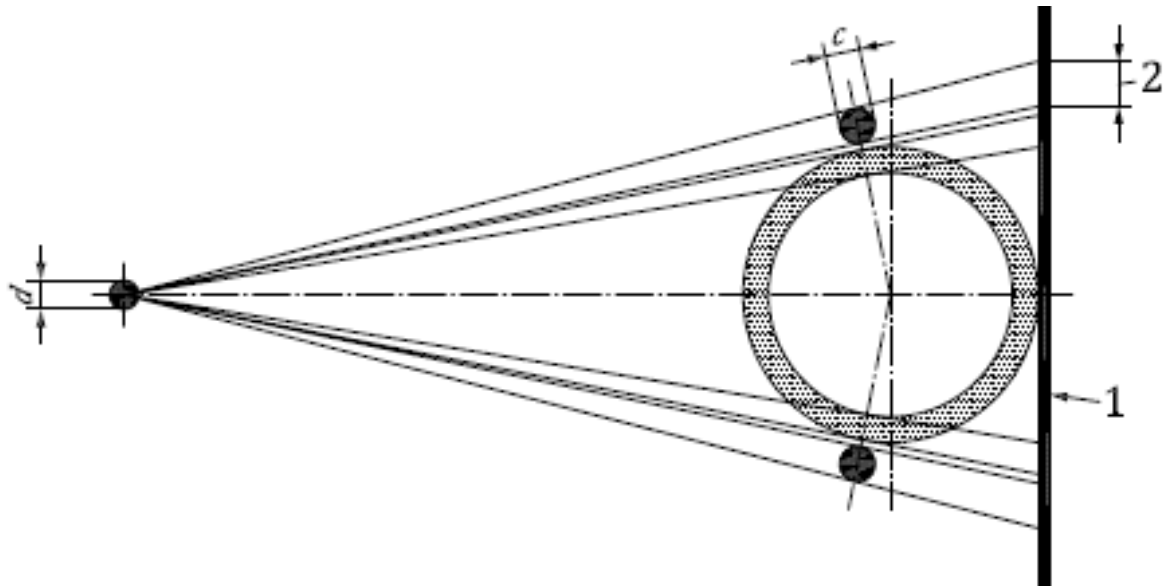


Figura 3.4 - Radiografia utilizando comparadores.
1 - Detetor/filme. 2 - Projeção do comparador. "c" - Comparador [26]

Para esta técnica recorre-se às expressões (3.1) e (3.2) de forma a determinar a radiação correta a usar e a distância a que a fonte deve estar do filme/detetor.

3.2.2. Radiografia Tangencial

A radiografia tangencial é uma técnica que tem como principal característica o alinhamento da fonte com a parede do tubo, reduzindo ao máximo a projeção de radiação. Este fenómeno de projeção leva à ampliação geométrica das imagens nos filmes radiográficos, resultando numa imagem menos nítida e em incorretas medidas de espessuras, sendo por vezes necessário utilizar um comparador, com uma medida conhecida, de forma a retirar proveito do melhor que esta técnica tem para oferecer.

A técnica tangencial foi utilizada do modo convencional (A) e com o dito comparador (B). Ambas as técnicas são apresentadas na norma ISO 20769-1.

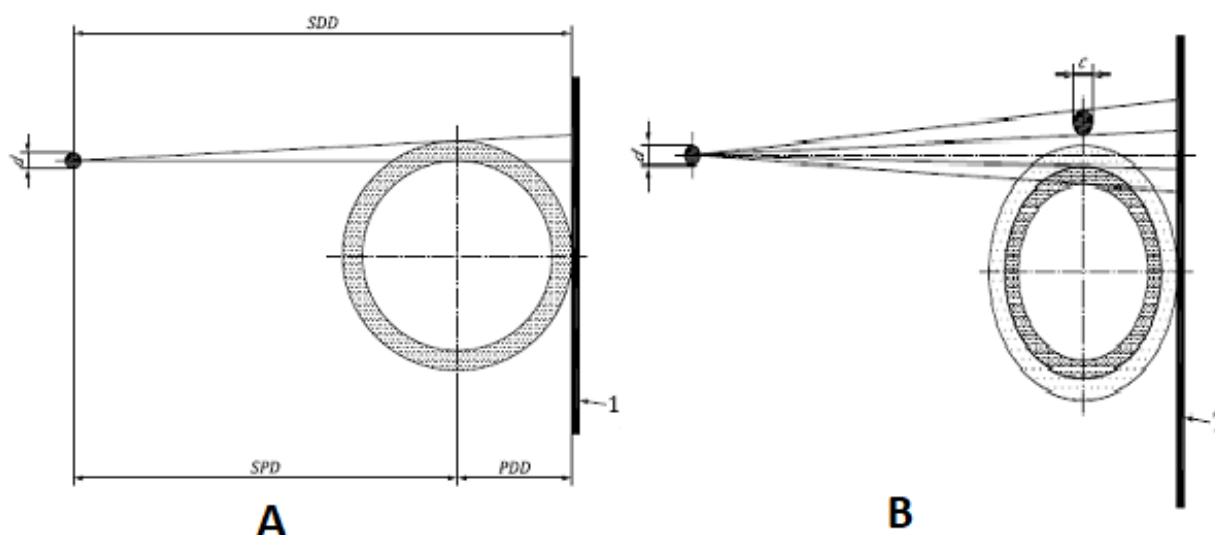


Figura 3.5 - (A) - Radiografia Tangencial. (B) - Radiografia Tangencial com comparador. [26]

3.2.3. Análise de Imagem

Como referido anteriormente, o método de captação da imagem pode ser feito de duas maneiras distintas, utilizando um filme radiográfico ou um detetor digital, sendo o equipamento de revelação de imagem distinto entre eles. Nos filmes é necessário revelar a imagem através de um processo manual, passando por químicos, tais como o revelador e o fixador e posterior secagem do filme.

A utilização dos detetores baseia-se na digitalização da imagem para o computador através de um equipamento de *scanning*, neste caso o HD-CR 35 NDT. Ao contrário dos filmes, os detetores podem ser reutilizados inúmeras vezes caso a informação seja apagada após cada utilização. A imagem é armazenada em formato digital e recorre-se ao *software* “iRad” para tratar e analisar a mesma.



Figura 3.6 - HD-CR 35 NDT, leitor de detetores digitais.

O método de observação das imagens também difere, visto que nos detetores a imagem é digitalizada para o computador e é neste que se obtém informação como a densidade ótica. Já nos filmes é necessário recorrer a dois equipamentos, o densitómetro e o negatoscópio.

O densitómetro, como o nome indica, fornece a densidade ótica de cada *pixel* do filme.



Figura 3.7 - Densitómetro. 1- Ponteira responsável por medir densidade. 2- Ecrã com valores de densidades.
3- Botão de *reset*.

O negatoscópio permite observar com detalhe o filme através da luz que o mesmo emite.



Figura 3.8 - Negatoscópio. 1- Ecrã de leitura dos filmes. 2- Interruptor da fonte de luz e de energia. 3- Regulador da quantidade de luz.

3.3. Objeto de estudo

O objeto de estudo neste trabalho consiste num tubo de refinaria com uma espessura nominal esperada de aproximadamente 7 milímetros de aço.

Foi cortado um terço do tubo original de forma a obter um padrão e tornar o tubo mais leve e fácil de manusear. Este pedaço de tubo foi designado de “tubo padrão”, de forma a facilitar a sua denominação durante os capítulos seguintes.

Fizeram-se algumas modificações no tubo padrão, tais como, a remoção de um terço do coque numa das extremidades do tubo (A) e na extremidade oposta a remoção de um terço de aço e coque (B).



Figura 3.9 - Extremidade com um terço de coque removido (A). Extremidade com um terço de coque e aço removido (B).

Através destas modificações é possível observar não só o comportamento dos ultrassons e da radiografia no tubo original, mas também a resposta que estas técnicas apresentam quando em contacto apenas com o aço.

Um entalhe com dimensões $10 \times 7 \text{ mm}^2$ foi feito no aço de forma a ser possível afirmar – com certeza – a espessura da camada de aço na radiografia, assim como facilitar a identificação de possíveis desalinhamentos entre a fonte e a parede do tubo padrão.



Figura 3.10 - Tubo com entalhe de dimensões $10 \times 7 \text{ mm}^2$.

3.4. Ultrassom convencional

Estes ensaios foram realizados utilizando o aparelho ‘Krautkramer USM 36’ e uma sonda direita de duplo cristal de 2 MHz.



Figura 3.11 - Sonda direita de duplo cristal 2 MHz.

Os ensaios iniciam-se com a calibração de cada uma das sondas num padrão que tenha uma composição semelhante à do material presente no tubo, que neste caso é aço-carbono. Nestes ensaios, o padrão selecionado foi precisamente o de aço-carbono com uma espessura de 25 milímetros.



Figura 3.12 - Padrão Aço-Carbono

O facto de as sondas serem duplo cristal e não apresentarem nenhum ângulo leva a que seja necessário colocar o *trigger* em *off* e o *pulse* na opção *dual*.

A calibração inicia-se com o acerto do posicionamento das *gates* A e B que vão ser responsáveis pela obtenção do pico de fundo e do 1º eco de fundo, respetivamente. Ajusta-se a velocidade de forma a obter-se o SBA pretendido, i.e., a distância entre o pico A e o pico B, que geralmente representa a distância a que se encontra o defeito. No entanto, caso o padrão não tenha qualquer defeito o SBA representa a espessura do mesmo. Para ajustar o SA, que é o pico de fundo, i.e., a profundidade, é necessário ajustar o *probe delay*.

Para o padrão usado neste trabalho, que tem 25 mm de espessura, é necessário ajustar a velocidade para que o SBA seja 25 mm e o *probe delay*, de forma a o SA seja também 25 mm. Após estes valores serem atingidos, a sonda encontra-se calibrada para o material aço-carbono, sendo apenas necessário ajustar o tamanho da janela e o ganho para uma obtenção de resultados mais corretos.

Após a calibração colocam-se as sondas sobre várias zonas do tubo com superfícies distintas. Cada zona tem uma espessura da camada de oxidação diferente, sendo possível chegar a uma relação entre a oxidação/qualidade de sinal.

3.5. EMAT

Nestes ensaios utiliza-se um equipamento EMAT, em concreto, o “temate® TG-IS”. Este contém uma sonda, um computador e uma fonte de geração de sinais.



Figura 3.13 - Fonte geradora de sinal.

A sonda é composta por um ímã e dois rolamentos, sendo que um deles funciona como *encoder*, i.e., dispositivo cuja funcionalidade é transformar a posição em sinal elétrico digital, possibilitando assim a quantização das distâncias. Contém ainda uma série de entradas que a ligam à fonte e um interruptor que permite ligar e desligar a corrente, sendo capaz de realizar a inspeção de forma independente do computador. Cada vez que se desliga e liga a sonda, esta automaticamente reconhece e começa a fazer uma nova aquisição de dados independente das anteriores.



Figura 3.14 - Sonda de EMAT. (1) - ímã; (2) - *Encoder*; (3) - Cabos que ligam à fonte.

Recorrendo ao *software* presente no computador, inicia-se a calibração da sonda num padrão escada com várias espessuras, mensuráveis exteriormente. Sabendo essas espessuras, introduz-se o valor das mesmas no programa para os diferentes degraus.



Figura 3.15 - Padrão escada.

Sabe-se que o tubo tem uma espessura nominal de 7 milímetros, logo, é apenas necessário calibrar cerca de cinco degraus no padrão, pois as espessuras dos mesmos estão entre 2,769 e 7,870 milímetros.

Assim, para o processo de calibração é necessário definir no *software* a espessura do padrão e colocar a sonda sobre este, verificando a espessura de cada um dos degraus.

Calibration Parameters			
Number of Calibration Steps		5	
Thickness at Step 1	0.1090 inches	2.7690 mm	
Thickness at Step 2	0.1610 inches	4.0890 mm	
Thickness at Step 3	0.2120 inches	5.3850 mm	
Thickness at Step 4	0.2598 inches	6.6000 mm	
Thickness at Step 5	0.3098 inches	7.8700 mm	
Thickness at Step 6	0.3591 inches	9.1200 mm	
Thickness at Step 7	0.4091 inches	10.3900 mm	
Thickness at Step 8	0.4602 inches	11.6900 mm	
Thickness at Step 9	0.5000 inches	12.7000 mm	
Thickness at Step 10	0.5000 inches	12.7000 mm	
Tolerance (+/-)		0.00591 inches	0.1500 mm

Figura 3.16 - Set-up de calibração. (1) – Interruptor; (2) – Padrão.

Após calibrar a sonda, basta colocá-la sobre a superfície do tubo que se pretende medir e aparecerá a resposta do som sob a forma de sinal, onde a amplitude é dada em função da distância percorrida pelo som.

4. Resultados

O problema principal desta dissertação deriva do facto de ainda não existir um método eficaz de medição da camada de coque dentro dos tubos de refinarias através de ensaios não destrutivos. Dito isto, neste capítulo pretende-se abordar os ensaios realizados em radiografia e em ultrassom com o intuito de conseguir distinguir e medir as três camadas presentes neste tipo de tubos, camada de oxidação, aço e coque.

4.1. Double Wall Single Image (DWSI)

Começou-se por olhar para a radiografia de forma a obter um padrão de resultados que depois pudesse ser complementado com os ultrassons. Essencialmente, o objetivo é, através da radiografia, obter a espessura da camada de oxidação – aço – coque e com os ultrassons obter a espessura da camada de oxidação – aço. Assim será possível alcançar o objetivo principal, através da combinação das duas técnicas, já que ao saber-se a espessura total do tubo através da radiografia e a espessura da camada de oxidação-aço através dos ultrassons, basta fazer a diferença entre os dois e o resultado será a espessura da camada de coque.

A abordagem radiográfica inicia-se com o cálculo de duas grandezas: SDD e w_{max} .

$$SDD \geq \frac{d \times PDD}{0.6 \text{ mm}} (=) SDD \geq \frac{3 \text{ mm} \times 72 \text{ mm}}{0.6 \text{ mm}} (=) SDD \geq 360 \text{ mm} \quad (4.1)$$

$$w_{max} = 2 \times \sqrt{t(D_e - t)} (=) w_{max} = 2 \times \sqrt{7 \text{ mm} (144 \text{ mm} - 7 \text{ mm})} \approx 61.93 \text{ mm} \quad (4.2)$$

Através da Tabela 1 presente na norma ISO 20769-1, pode observar-se que, para um valor de $55 \leq w_{max} \leq 80$, o mais apropriado é utilizar um isótopo de Iridio (Ir-192). No entanto, este não estava disponível e a máquina de raios-X com maior energia apenas atingia os 170 keV. Devido a este contratempo, foi necessário ajustar-se alguns dos parâmetros anteriormente calculados.

Aumentou-se o SDD para 600 mm, de forma a reduzir a ampliação geométrica da imagem e por consequência aumentou-se o tempo de exposição. A energia foi colocada a 150 keV e a corrente a 3 mA, sendo que a corrente irá manter-se neste valor durante todos os ensaios, alterando apenas o valor da energia. Realizaram-se assim os primeiros ensaios através da técnica DWSI.

Para avaliar a qualidade da imagem durante os ensaios é necessário a utilização de um *Image Quality Indicator* (IQI), isto é, um dispositivo que contém uma série de filamentos de espessura gradual através dos quais é possível avaliar a qualidade da imagem com base no número de filamentos que são possíveis observar numa imagem radiográfica.

Surge ainda um problema que reside na diferente espessura da camada de oxidação ao longo do tubo. Assim, e de forma a simplificar o problema, momentaneamente os ensaios foram realizados na zona do tubo onde a camada de oxidação pode ser considerada nula. Deste modo é possível focar o problema principal, a camada de coque, e posteriormente resolver o problema da oxidação.

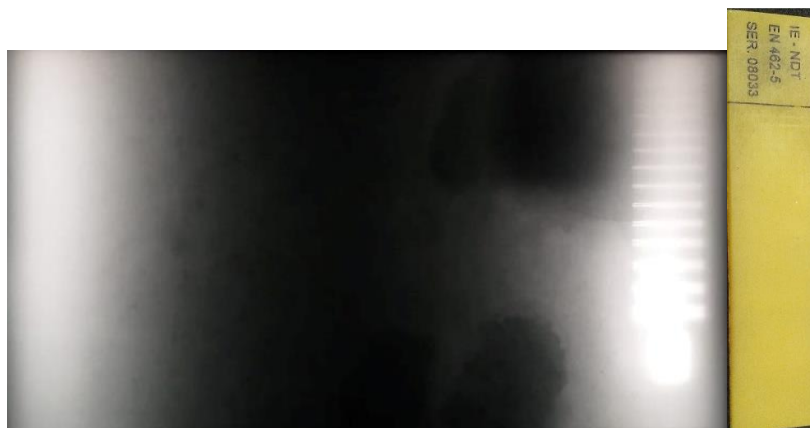


Figura 4.1 - Radiografia utilizando a técnica DWSI (direita) com SDD = 600 mm; 150 keV; 3 mA; 15 min.

Após finalizar estes ensaios, os filmes foram colocados no densitômetro e concluiu-se que a radiação aplicada não foi suficiente para que estes apresentassem a densidade ótica pretendida, isto é, 2.5 na zona da parede tubular. Desta forma, não foi possível observar as diferentes camadas do tubo.

Realizaram-se novos ensaios, mas desta vez foi colocado um comparador, pois na eventualidade de obter a espessura das camadas, seria necessário um comparador para obter a espessura real das mesmas. Este processo está descrito no capítulo 3.2.1.



Figura 4.2 - Radiografia utilizando a técnica DWSI com comparador e SDD = 600 mm; 170 keV; 3 mA; 15 min.

O resultado deste ensaio é bastante semelhante ao do anterior, sendo impossível observar qualquer uma das camadas e também observar o comparador. Porém, nota-se uma melhoria da qualidade da imagem proveniente do aumento da energia.

Ainda assim, conclui-se que esta técnica é inadequada para tubos com estas dimensões, quando a energia a utilizar é igual ou inferior a 170 keV.

4.2. Tangencial

Devido à inexistência de resultados satisfatórios nos ensaios anteriores, mudou-se de abordagem e iniciaram-se ensaios através da técnica de radiografia tangencial. O que se pretende com esta mudança é o alinhamento da fonte com a parede lateral do tubo, de forma a reduzir a projeção do tubo no filme. Os parâmetros utilizados foram semelhantes aos ensaios anteriores, SDD = 600 mm, 10 minutos de exposição, 150 keV de energia e 3 mA de corrente.



Figura 4.3 - Radiografia tangencial. SDD = 600 mm; 150 keV; 3 mA; 10 min.

Apesar do aparecimento de duas marcas que podiam corresponder às camadas de aço e coque, não há maneira de comprovar esta hipótese sem que sejam feitas alterações ao tubo e novos testes. A primeira hipótese colocada foi a possibilidade de ser uma soldadura. Para tal, realizaram-se novos testes, rodando-se o tubo cerca de 45°. No entanto, os resultados foram semelhantes sendo esta hipótese posta de parte.

Pensou-se então em remover camadas de cada uma das pontas do tubo, sendo que numa extremidade se removeu apenas coque e na outra aço e coque (Figura 4.4). Os ensaios procederam, mas foi necessário aumentar a energia para 170 keV, uma vez que a densidade ótica não apresentava os níveis ideais ($D.O. \approx 2.5$ na zona da parede). Todos os outros parâmetros foram mantidos do ensaio anterior e foi possível observar a remoção da camada de aço e coque.

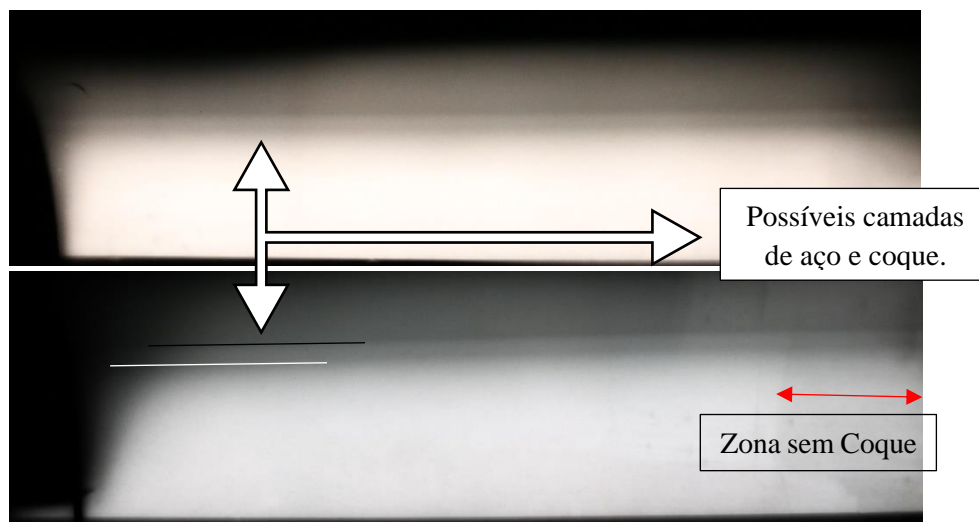


Figura 4.4 - Radiografia ao tubo inalterado (cima). Radiografia ao tubo sem 1/3 da camada de aço e coque (baixo). SDD = 600 mm; 170 keV; 3 mA; 10 min.

Na extremidade onde foi removido apenas coque era de esperar que a marca de baixo (linha branca) terminasse antes do fim do tubo e que a marca de cima continuasse (linha preta). Contudo, tal não aconteceu e questionou-se a capacidade de a radiografia convencional distinguir o aço do coque.

Radiografias Digitais

Face à dificuldade encontrada nas radiografias convencionais, recorreu-se à radiografia digital, pois esta permite aplicar filtros às imagens e observar detalhes que outrora não seriam possíveis de verificar a olho nu nas radiografias convencionais.

Após vários testes de tentativa e erro com a radiografia digital notou-se que este tipo de teste exige um tempo de exposição diferente relativamente aos ensaios convencionais. O tempo de exposição varia para diferentes tipos de filme e para diferentes fontes.

Portanto, aumentou-se o tempo de exposição de forma a atingir uma D.O. razoável, chegando a um tempo de exposição de 30 minutos. Mas para este tempo surge um novo problema, a radiação dispersa. Para combater esta radiação foi necessário isolar o tubo colocando peças de chumbo a cobrir todos os lados do tubo, à exceção da face superior, onde incide a radiação.

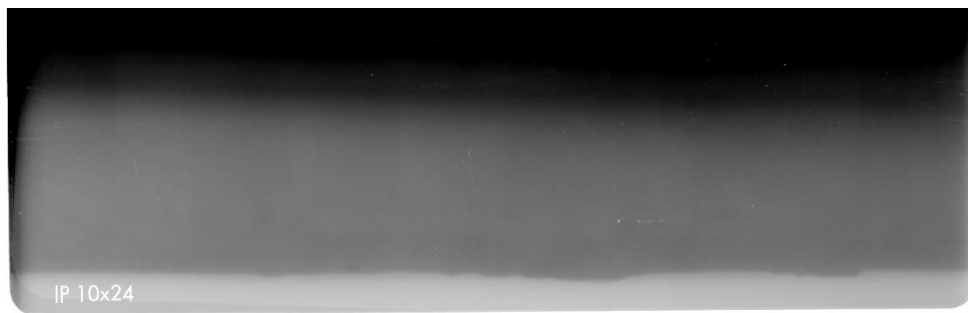


Figura 4.5 - Radiografia Digital. SDD = 600 mm; 150 keV; 3 mA; 30 min.

Como se pode observar a radiografia digital não apresentou quaisquer marcas como a radiografia convencional, sendo possível a energia ser demasiado elevada para este tempo de exposição. Assim a energia é reduzida para 100 keV.

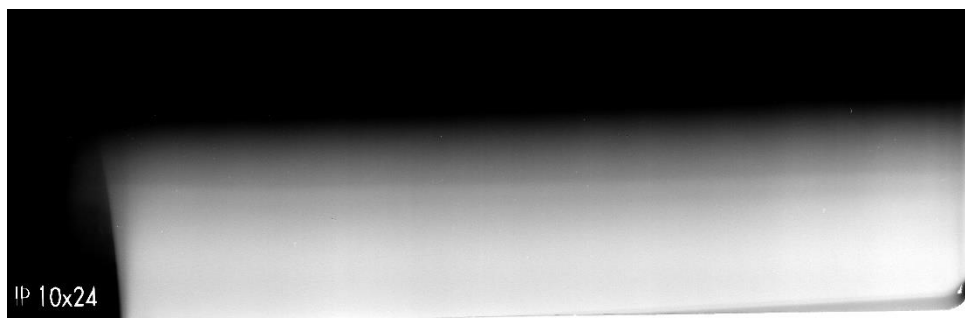


Figura 4.6 - Radiografia Digital. SDD = 600 mm; 100 keV; 3 mA; 30 min.

Os novos parâmetros levam a uma imagem mais nítida, sendo possível observar a marca superior com maior clareza do que a inferior. No entanto, é incorreto exercer qualquer tipo de conclusão sobre o limite da marca inferior, pois não é possível observar se esta, tal como no caso convencional, existe mesmo na zona onde não há coque.

A incerteza relativamente aos resultados obtidos leva a uma nova alteração física no tubo, no sentido de provar que a marca superior corresponde de facto à superfície de metal. A alteração física foi

denominada de entalhe, um corte com dimensões 10 mm x 7 mm, feito entre a superfície superior do aço e superfície superior do coque.

Radiografia convencional e digital com entalhe

Para verificar a hipótese de a marca superior coincidir com a camada de aço, realizaram-se radiografias convencionais e digitais. Os parâmetros de radiografia mantiveram-se para ambos os testes.

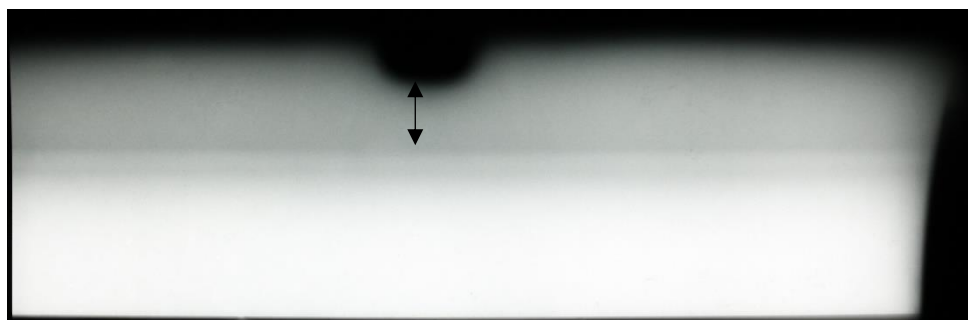


Figura 4.7 - Radiografia convencional com o entalhe. SDD = 600 mm; 170 keV; 3 mA; 10 min.

Como se pode ver na radiografia convencional, existe uma discrepância entre o fim do entalhe e a marca superior, que deveria corresponder ao aço. Perante este facto, torna-se claro que pelo menos uma das marcas não corresponde ao esperado, levando assim a uma nova fase de testes.

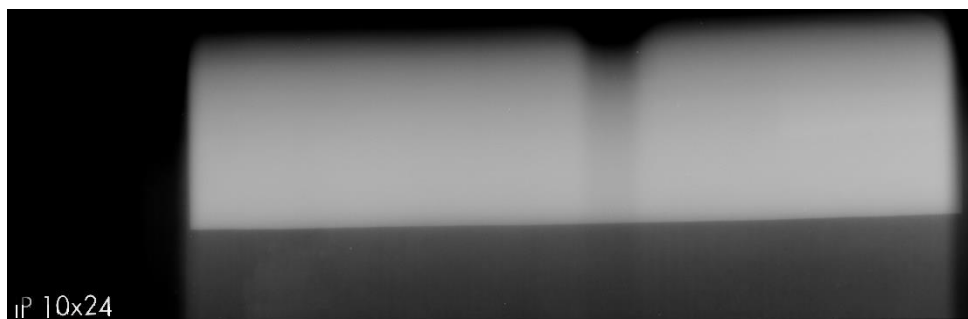


Figura 4.8 - Radiografia digital com o entalhe. SDD = 600 mm; 100 keV; 3 mA; 30 min.

Os ensaios realizados através do método digital não surtiram efeito, uma vez que as marcas anteriores não são possíveis de observar.

Radiografia convencional e digital com peça de chumbo

Foi ainda realizado mais uma bateria de testes, porém desta vez foi colocada uma peça de chumbo no interior do tubo junto à superfície interna de coque. Ora, se uma das marcas fosse realmente a superfície de coque, então a peça de chumbo deveria aparecer imediatamente abaixo das mesmas.

Para uma fácil identificação desta peça, foi colocada uma caixa de limites pretos na zona no local da imagem onde esta se encontra. Contudo, não é, uma vez mais, possível observar as marcas. Ou seja, a peça de chumbo torna-se irrelevante, sendo inconclusivos os testes com a radiografia digital.

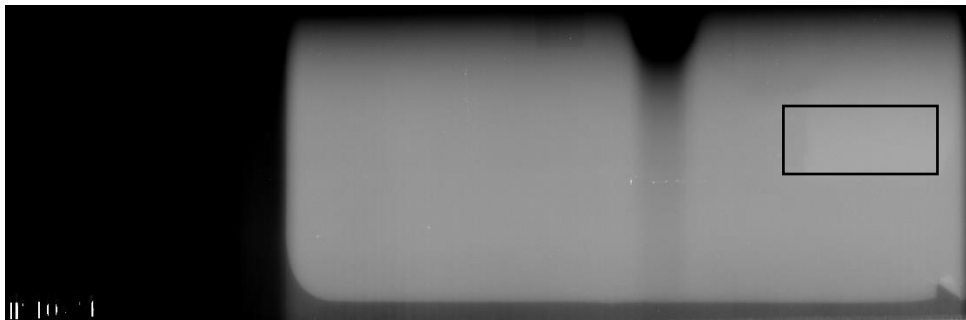


Figura 4.9 - Radiografia digital com a peça de chumbo. SDD = 600 mm; 100 keV; 3 mA; 30 min.

Por outro lado, os testes para a radiografia convencional demonstram que a superfície superior da peça de chumbo não coincide com nenhuma das superfícies inferiores das marcas, o que permite concluir que nenhuma das marcas corresponde à superfície de aço ou coque.

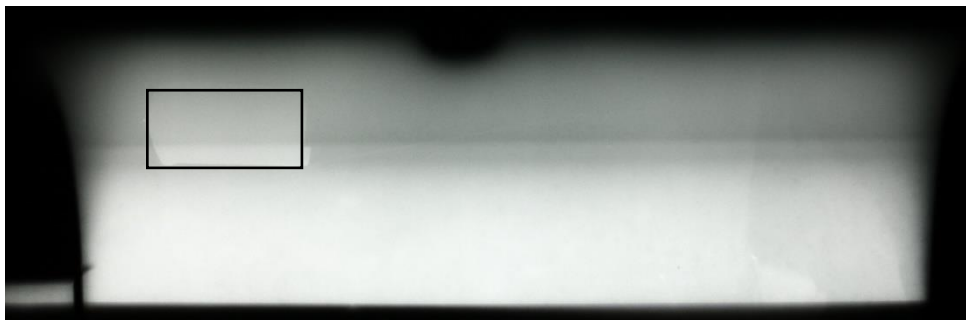


Figura 4.10 - Radiografia convencional com a peça de chumbo. SDD = 600 mm; 170 keV; 3 mA; 10 min

Após terminar estes ensaios torna-se claro que o equipamento de raios-X com energia máxima de 170 keV não tem capacidade para fornecer o tipo de dados pretendidos. Assim, irá mudar-se de radiação e os ensaios passam a ser efetuados com dois isótopos distintos, o Irídio (Ir-192) e o Selénio (Se-75).

4.3. Gamagrafia

Devido à incapacidade de obter resultados satisfatórios durante o processo de radiografia utilizando raios-X, foi utilizado o Irídio-192, isótopo que esteve disponível durante um pequeno período de tempo, mas suficiente para entender que, tal como descrito na norma, é ideal para o tipo de estudo realizado. Ainda assim, testou-se mais um isótopo, o de Selênio-75 e os resultados foram satisfatórios.

Irídio-192

Antes de partir para os ensaios, foram levantadas algumas questões relativamente aos parâmetros que deveriam ser aplicados. Note-se que o irídio estava no pico de radioatividade e apresentava uma atividade de 48.7 Ci. Para tal, foram necessários alguns ajustes e colocou-se a ponteira do equipamento a aproximadamente 850 mm do filme, ou seja, o SDD = 850 mm. Faltando assim ajustar o tempo e sendo necessário vários testes para fazê-lo, atingiu-se um tempo ideal de 20 minutos. Por “tempo ideal” entende-se que para 20 minutos a D.O. ≈ 2.5 na região da parede tubular.

Com estes ensaios pretende-se e espera-se resolver os problemas deixados pela radiografia com raios-X, tais como perceber se as marcas apresentadas nos ensaios anteriores continuam aparecer, se estas coincidem com o entalhe no caso do aço e com a peça de chumbo no caso do coque, e se a técnica de radiografia tangencial utilizando os raios gama consegue determinar e distinguir as camadas de aço e coque.

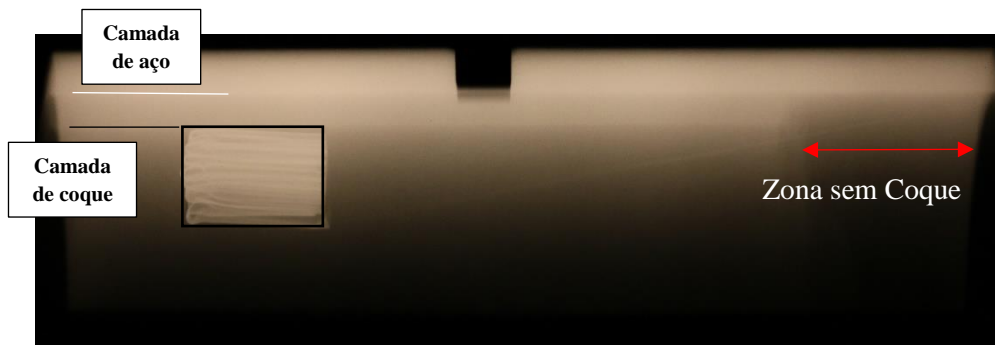


Figura 4.11 - Radiografia com isótopo de Ir-192. SDD = 850 mm; 20 min.

Contrariamente ao que acontecia com o raio-X, é possível observar o coque removido da extremidade do tubo à direita da imagem: a extremidade da marca inferior coincide com a superfície superior da peça de chumbo e termina na região onde já não há coque, e a marca superior coincide com o entalhe feito no tubo. Com estas observações torna-se claro que se verificam as camadas coque e aço, respetivamente.

Mas um problema continua por resolver. Todos os ensaios realizados até ao momento foram efetuados na parede do tubo com menos irregularidades e com uma camada de oxidação desprezável. Por isso, é necessário testar se esta técnica tem capacidade de captar e distinguir três camadas distintas.

Para estes ensaios optou-se por utilizar os mesmos parâmetros que no ensaio anterior, SDD = 850 mm e 20 minutos de tempo de exposição.

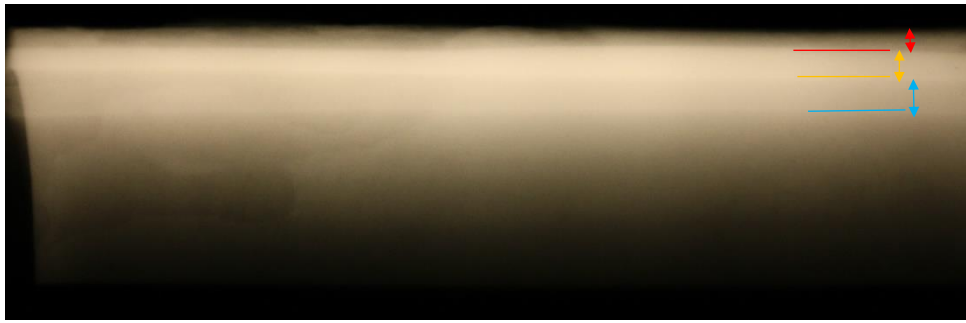


Figura 4.12 - Radiografia com isótopo de Ir-192 à parede com elevada quantidade de oxidação. SDD = 850 mm; 20 min. (Camadas: Oxidação - vermelho; Aço - amarelo; Coque – azul)

Analisando a imagem é possível observar com alguma facilidade as três camadas existentes no tubo, podendo afirmar-se que o Irídio-192 é um isótopo viável para a aquisição e determinação de camadas do tubo através da gamagrafia.

Com estes resultados foi possível desmistificar o problema principal, no entanto esta técnica tem de ser aplicada em obra. Como tal, é necessário otimizar o procedimento e adaptar o ensaio às necessidades que uma inspeção acarreta.

Um dos principais problemas da utilização deste isótopo é a quantidade de radiação que o Ir-192 emite, sendo necessário a fonte apresentar, no máximo, 30 Ci de atividade para poder ser utilizada em obra. Durante as paragens para inspeção, existem centenas de pessoas a trabalhar no local, sendo essencial que a radiação proveniente do isótopo seja limitada à zona de inspeção, neste caso, o tubo. Para possibilitar este contexto, recorreu-se à mecanização de uma peça de chumbo a obter um colimador.

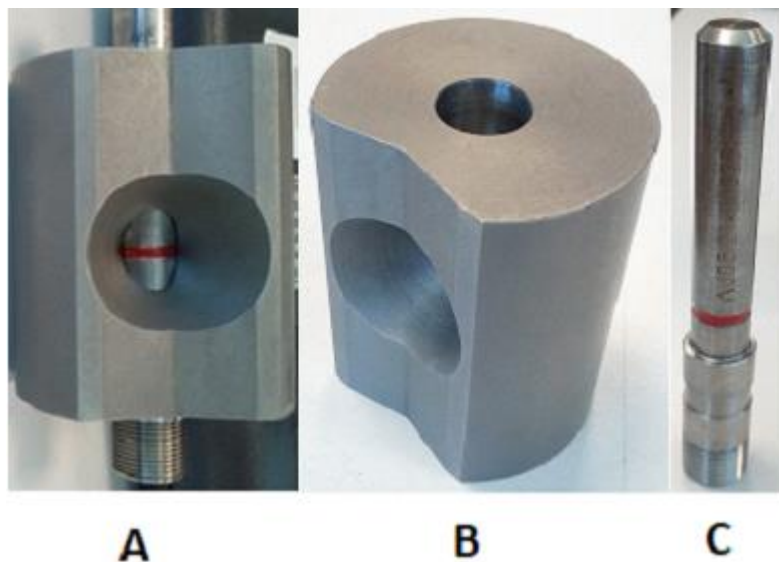


Figura 4.13 - Colimador e Ponteira (A); Colimador (B); Ponteira (C).

Otimização de processos (Ir-192)

Durante as paragens para inspeções, quanto mais expedito for o processo de radiografia melhor, sendo difícil que um teste com uma duração de 20 minutos seja valorizado. Surge assim um problema de otimização que leva à necessidade de se diminuir o tempo de exposição.

Uma maneira de reduzir o tempo de exposição é encostar a ponteira do equipamento à parede tubular, fazendo assim um teste por contacto. Para a realização deste teste tem-se $SDD = 150$ mm, que é o diâmetro do tubo e um tempo de exposição de 4 minutos.

Para os ensaios finais com o Ir-192, utilizou-se o IQI e o comparador, que é um ímã em forma de anel com 5,9 mm de espessura. Rodou-se ainda o tubo 45° de forma a não captar o entalhe pois, para este teste em específico, a informação que o mesmo representa é irrelevante. A quantidade de oxidação nestes ensaios era desprezável, podendo considerar-se apenas duas camadas.

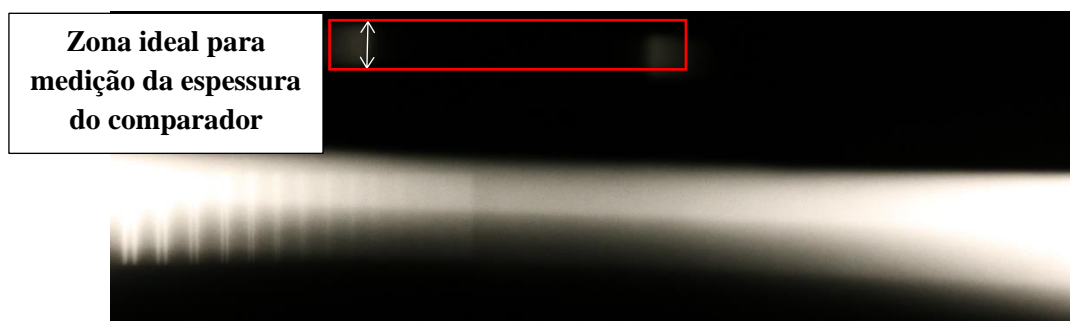


Figura 4.14 - Radiografia com Ir-192 com comparador e IQI; $SDD = 150$ mm; 4 min.

Apesar da D.O. apresentar valores aceitáveis, a quantidade de radiação projetada, devido à proximidade da fonte com o tubo, torna o teste inadequado. Exemplo disso é a medição da espessura da camada de coque. Ora, a maneira mais fiável de medir a espessura do comparador é nas extremidades do mesmo, pois no seu centro o valor da espessura não corresponde a um valor “real”.

Para realizar uma comparação é mais correto comparar-se a extremidade do tubo com a extremidade do comparador. Como nas extremidades do filme a camada de coque fica praticamente no limite do mesmo, se a camada de coque fosse mais espessa seria impossível medir com precisão a sua espessura. Além disto, é bastante visível a zona de penumbra causada pela proximidade da fonte ao filme, o que torna os limites das camadas pouco perceptíveis.

Assim, o teste por contacto foi descartado das possíveis soluções para ao problema do tempo de exposição. Todavia, o valor apresentado na norma para o SDD era de 360 mm, quando o tubo tem um valor de $PDD = 72$ mm, assim colocou-se a ponteira a 360 mm do filme e por consequência reduziu-se o tempo de exposição para 7:30 minutos perdendo alguma da definição relativamente ao ensaio original com $SDD = 850$ mm para 20 minutos de exposição. Mas poupa-se bastante tempo, algo de extremo valor no contexto de inspeções periódicas obrigatórias.

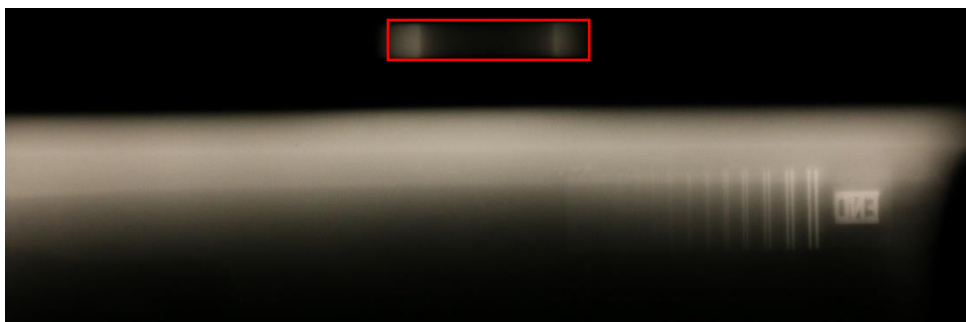


Figura 4.15 - Radiografia com Ir-192 com comparador e IQI; SDD = 360 mm; 7:30 min.

Neste ensaio é possível observar com clareza as duas camadas, o comparador e o IQI. Contudo, a D.O. não estava dentro dos limites aceitáveis, tendo sido necessário aumentar o tempo de exposição para 10 minutos. Neste teste os valores de D.O. eram válidos e, apesar de o comparador se tornar menos nítido, as fronteiras entre camadas no tubo tornaram-se mais explícitas.

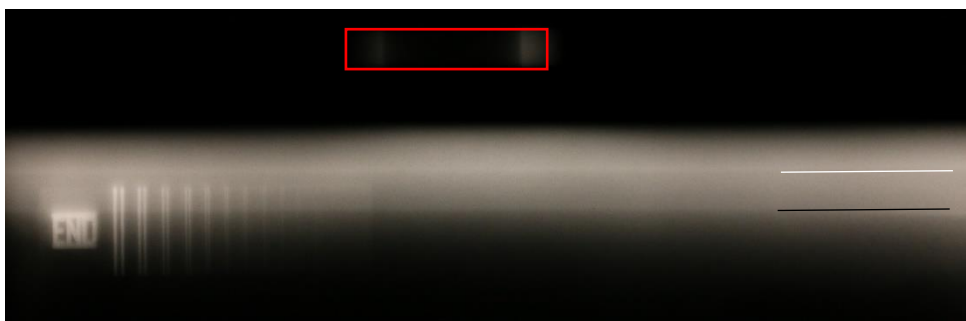


Figura 4.16 - Radiografia com Ir-192 com comparador e IQI; SDD = 360 mm; 10 min.

Infelizmente, não foi possível testar a radiografia digital para o isótopo de Ir-192. Ainda assim, os resultados obtidos pelo método convencional permitem analisar matematicamente as espessuras de forma a calcular qual a espessura real de cada uma das camadas e determinar a percentagem de corrosão sofrida no aço consoante os valores do fabricante. Como descrito anteriormente, o cálculo de cada um destes valores tem por base uma regra de três simples entre o valor real do comparador e os valores medidos do comparador e do aço ou do coque.

O erro relativo é calculado de forma a demonstrar a viabilidade da técnica, sendo o erro mais elevado aproximadamente 5%.

Tabela 4.1 - Valores das espessuras do comparador, aço e coque e respetivo erro relativo

	Comparador		Aço			Coque		
	Real (mm)	Medido (mm)	Real (mm)	Medido (mm)	Calculado (mm)	Real (mm)	Medido (mm)	Calculado (mm)
	5,9	6,8	7	8,1	7,02	4,6	5,6	4,85
Erro Relativo %	-	-	-	-	0,28	-	-	5,43

O valor calculado do aço não pode ser superior ao valor real do mesmo, no entanto facilmente se percebe que pode ter ocorrido um erro humano na obtenção do valor medido ou até mesmo uma espessura residual de oxidação que não seja possível de identificar a olho nu no filme e que, desta forma, aumenta o valor da espessura da camada de aço.

Na realidade, durante uma inspeção apenas é possível saber o valor real da camada de aço e do comparador, ambos fornecidos pelos respetivos fabricantes. Visto que o coque está no interior do tubo, não é possível obter a sua espessura real e por consequência torna-se impossível calcular o erro relativo associado ao valor calculado.

Logo, numa situação real, a Tabela 4.2 mostra a taxa de progressão das diferentes camadas, pois o erro relativo é um dado irrelevante no que toca a inspeções.

Tabela 4.2 - Tabela real de valores do comparador, aço, coque e respetiva taxa da progressão

	Comparador		Aço			Coque	
	Real (mm)	Medido (mm)	Real (mm)	Medido (mm)	Calculado (mm)	Medido (mm)	Calculado (mm)
	5,9	6,8	7	8,1	7,02	5,6	4,85
Taxa %	-	-	-	-	0,28	-	-

Caso o ensaio fosse realizado numa parede onde a espessura da camada de oxidação é significativa, o processo seria exatamente igual. Não seria possível calcular taxa de progressão de nenhuma das camadas, à exceção da de aço.

No entanto, a análise da taxa de progressão do coque e do óxido apenas é possível se, aquando das inspeções, os locais do tubo a inspecionar forem sempre (aproximadamente) os mesmos. Fundamentalmente seria possível utilizar valores obtidos em inspeções anteriores e considerá-los como reais, observando assim a evolução ou regressão de todas as camadas presentes no tubo.

Selénio-75

Com os testes do Irídio completos, resta agora tentar encontrar uma alternativa ao isótopo de Irídio. Para tal recorreu-se ao Selénio-75, que segundo a norma de radiografia, é o isótopo imediatamente abaixo do Ir-192 na escala de energia radioativa, para fins de ensaios não destrutivos. Sabendo que o Se-75 é duas vezes menos energético que o Ir-192, colocou-se a ponteira a 360 mm do filme (SDD = 360 mm), e duplicou-se o tempo de exposição relativamente ao ensaio de Ir-192, ou seja, utilizou-se um tempo de exposição de 20 minutos.

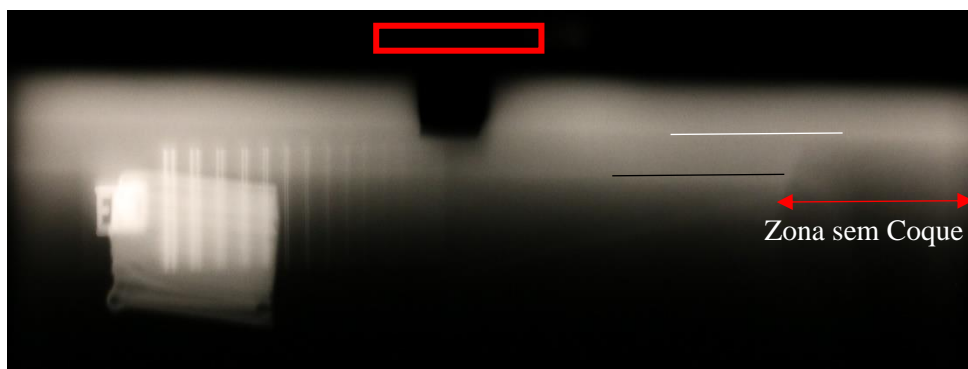


Figura 4.17 - Radiografia com Se-75 com comparador e IQI; SDD = 360 mm; 20 min

É possível observar a existência de marcas semelhantes à radiografia com Ir-192, podendo afirmar-se que estas correspondem às fronteiras entre camadas através do entalhe e da peça de chumbo. Mas é possível, sem medir a D.O., dizer que o tempo de exposição utilizado não é suficiente devido ao não aparecimento do comparador, sendo o retângulo vermelho () o local onde o mesmo deveria aparecer.

Numa tentativa de melhorar a definição dos limites das camadas e de tornar visível o comparador, aumentou-se o tempo de exposição para 25 minutos.

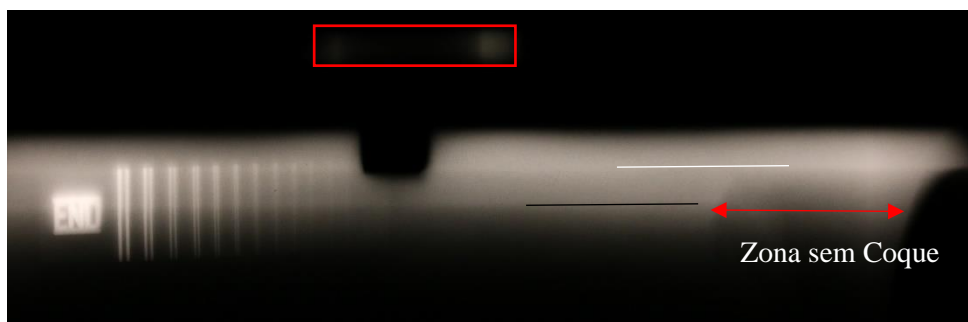


Figura 4.18 - Radiografia com Se-75 com comparador e IQI; SDD = 360 mm; 25 min.

Após atingir resultados satisfatórios numa primeira fase, era necessário otimizá-los de forma a melhorar o tempo de exposição de 25 minutos, algo que seria um entrave à utilização desta técnica em obra de inspeção.

Se para um tempo de exposição de 20 minutos a radiografia já não é capaz de marcar o comparador no filme, tal é impossível para um tempo de exposição de 10 minutos.

Radiografia Digital (Se-75)

Pensou-se na técnica de radiografia digital, pois o programa “i-Rad” tem uma panóplia de ferramentas de edição de imagem que poderia permitir ter qualidade de imagem e em simultâneo baixar o tempo de exposição, mesmo sabendo que em exames anteriores o tempo de exposição nos exames digitais foi superior quando comparado com os exames convencionais.

Posto isto, nestes ensaios o tempo de exposição foi reduzido para aproximadamente metade e voltou-se a introduzir a peça de chumbo no interior do tubo colocado sobre a parede de coque para confirmar a posição das camadas de aço e coque.

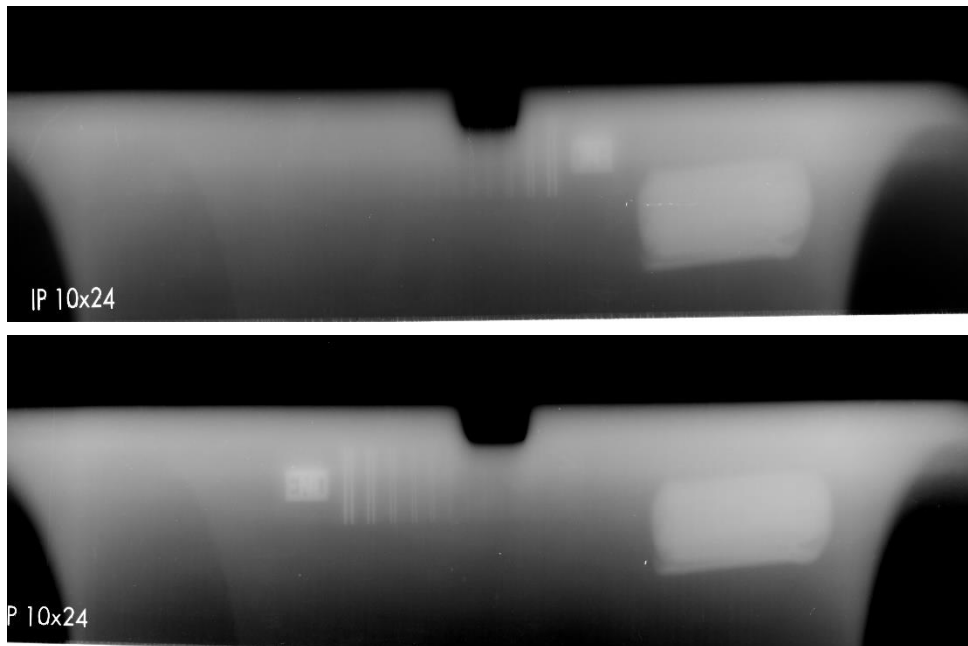


Figura 4.19 - Radiografia digital com Se-75 com comparador e IQI; SDD = 360 mm; 7 min (cima) e 12 min (baixo).

Tal como anteriormente, a radiografia digital não é capaz de fornecer a separação e a espessura das camadas de aço e coque. Podia aumentar-se o tempo de exposição acima dos 12 minutos, no entanto o propósito de otimização perdia o seu valor e a D.O. deixava de ser aceitável.

Finalizando os ensaios construiu-se uma tabela estabelecendo um elo de ligação entre as duas técnicas, comparando as características de ambas de uma maneira mais sucinta.

Tabela 4.3 – Raios X vs Raios Gama

	Raios X (Andrex)	Raios Gama
Tempo de Montagem	≈ 1 hora	≈ 5 minutos
Tempo de Montagem entre tubos	≈ 20 minutos	≈ 5 minutos
Tempo de Teste	≈ 30 minutos para sondas com energia superior a 300 keV	≈ 10 minutos
Qualidade de filme	Baixa	Elevada
Dimensões do equipamento (fonte)	670 mm x 300 mm	300 mm x 130 mm
Mobilidade da Fonte	Baixa	Elevada (adaptável à parede do tubo)
Peso do equipamento	28 Kg	23 Kg

4.4. Ultrassom convencional

Nos ensaios com ultrassom convencional utilizou-se uma sonda direita de duplo cristal de 2 MHz. Os testes iniciaram-se com a calibração de cada sonda no padrão aço-carbono com 25 milímetros de espessura. Após ajustadas e calibradas as sondas como descrito no capítulo 3.4, é possível obter os seguintes sinais.

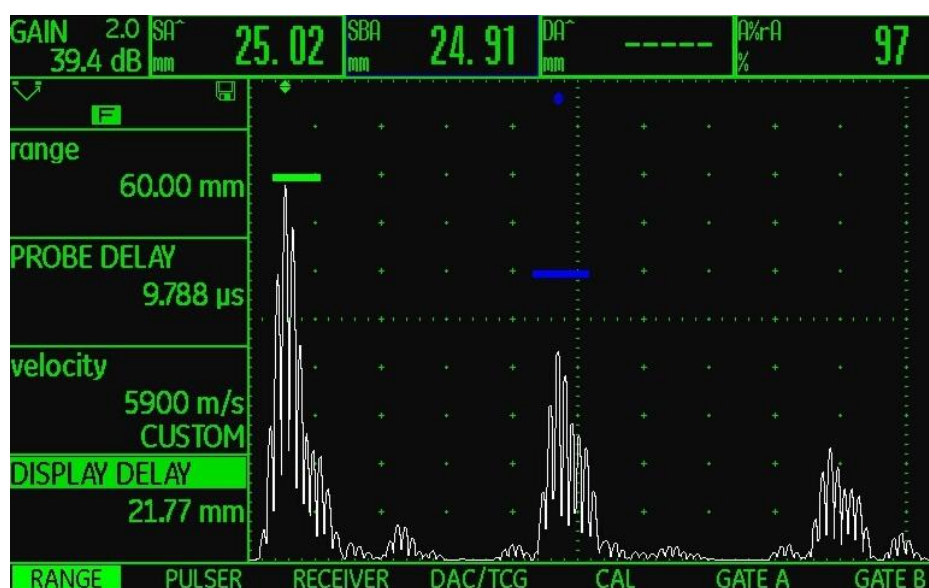


Figura 4.20 - Calibração com o padrão aço-carbono.

Como é possível observar a sonda direita de 2 MHz está calibrada para o aço quando o *probe delay* é de 9,788 μs e a velocidade de propagação do som é 5900 m/s. O SA e o SBA apresentam valores corretos para a espessura real do padrão, de aproximadamente 25 milímetros.

Sonda de 2 MHz

Para esta sonda testou-se primeiro a resposta do sinal quando colocado sobre as amostras de aço e coque (Figura 4.21). O metal tinha 7,7 milímetros de espessura e o coque 5,15 milímetros.



Figura 4.21 - Amostra do tubo (1); Amostra de coque (2).

A resposta da sonda foi extremamente positiva, sendo possível observar o eco de fundo, o 1º, 2º e 3º eco e confirmar a espessura medida anteriormente ao ensaio. A espessura da amostra do tubo é dada por SBA, sendo 7,07 milímetros um valor aproximado dos 7,7 milímetros reais. Comprova-se assim, que os ultrassons são capazes de fornecer um sinal para este tipo de tubos quando este se encontra separado das suas camadas de coque e óxido. O valor de SA é cerca de 8,31 milímetros devido à irregularidade e curvatura da superfície.

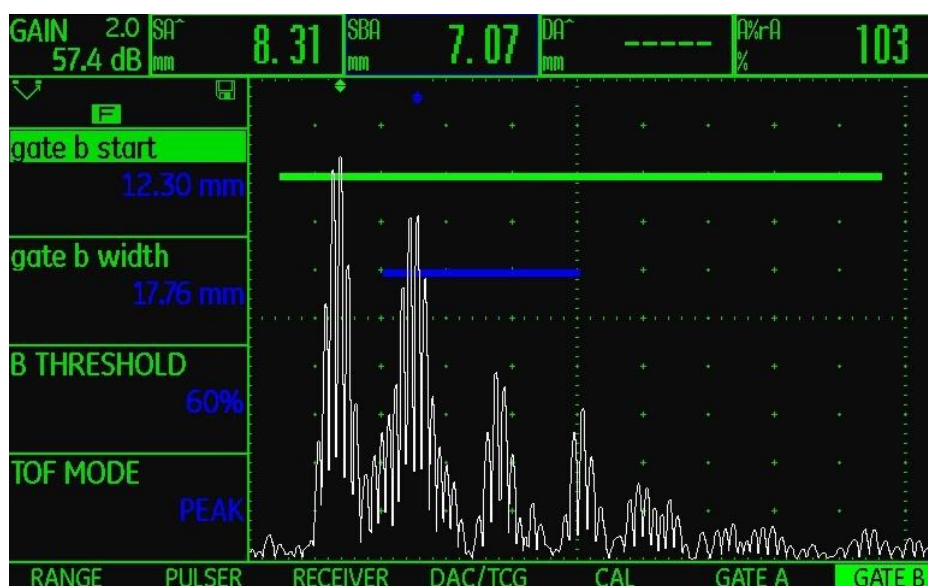


Figura 4.22 - Ultrassom com sonda direita duplo cristal de 2 MHz, numa amostra do tubo de aço.

Foi então realizado o ensaio para a peça do coque, no entanto foi necessário descobrir a velocidade de propagação do som no coque, que como se sabe é diferente da velocidade no aço. Para tal, alterou-se a velocidade e o *probe delay* até que os valores de SA e SBA coincidissem com a espessura real da amostra de coque. Os valores para os quais foi possível observar o sinal do som no coque foram, 2990 m/s no caso da velocidade e 9,845 μs de *probe delay*.

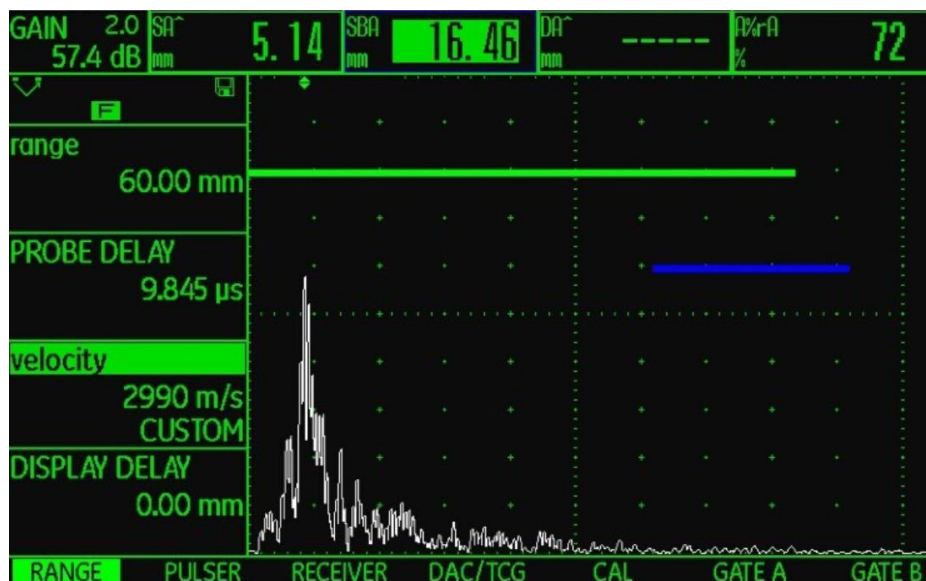


Figura 4.23 - Ultrassom com sonda direita duplo cristal de 2 MHz, numa amostra de coque.

Na imagem 4.23 é evidente a atenuação sofrida pelo sinal, pois é possível observar a ocorrência de novos ecos. Para observar o sinal do som no coque foi necessário aumentar o ganho e por consequência o ruído também aumentou, sendo esta mais uma evidência da elevada atenuação do som no coque.

Para confirmar o resultado anterior procurou-se uma zona do tubo em que a quantidade de óxido e coque fossem desprezáveis e conseguiu-se obter o valor aproximado da camada, bem como a repetição dos ecos obtidos para o pedaço de aço retirado do tubo. O valor do SA e do SBA estão bastante aproximados, o que indica a uniformidade da camada de aço, no entanto a discrepância do valor do SA relativamente ao valor real de 7,7 milímetros, deve-se à irregularidade da superfície da camada de aço.

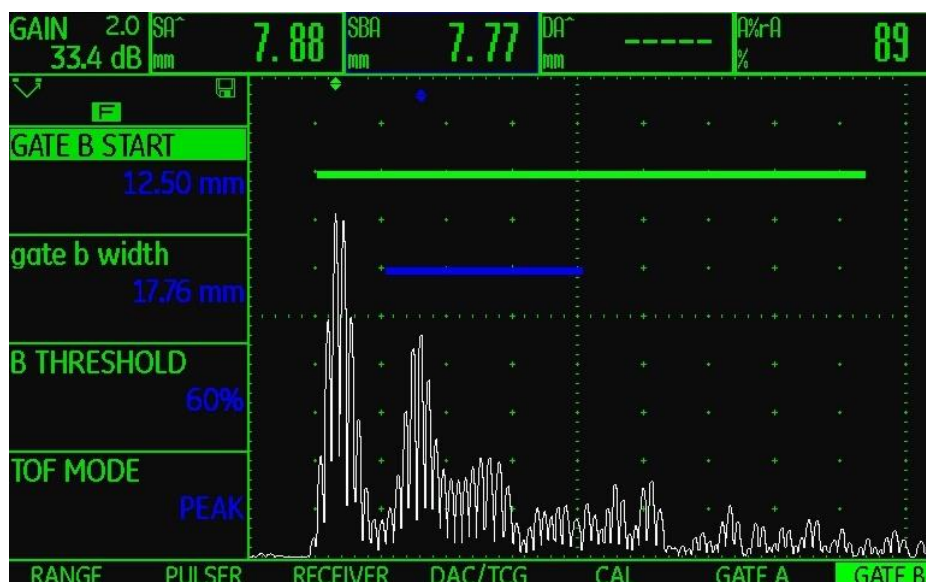


Figura 4.24 - Ultrassom com sonda direita duplo cristal de 2 MHz, numa zona do tubo sem coque e sem óxido.

Partiu-se assim para uma nova fase de ensaios, com o objetivo de perceber se era possível obter a espessura da camada de aço/coque e a da camada de óxido/aço/coque. Para tal, colocou-se inicialmente a sonda numa zona com uma camada de oxidação desprezável, de forma a perceber que tipo de sinal iria obter.

Ao observar o sinal gerado, é possível verificar que o SBA tem um valor aceitável relativamente à espessura do aço. No entanto, a amplitude do 1º eco é reduzida quando comparada com o eco de fundo, devido à atenuação do sinal quando em contacto com a camada de coque. O valor de SA devia ser de aproximadamente 11,49 milímetros, que representaria a espessura das camadas de aço (7,43 milímetros) e coque (4,06 milímetros) juntas. Como o valor apresentado é de 9,07 milímetros, pode concluir-se que o som não atravessou a camada de coque. A dificuldade de assentar a sonda sobre a superfície do tubo, devido a irregularidades na camada exterior do aço e à curvatura que a mesma apresenta, leva a que o valor de SA não seja o mais correto.

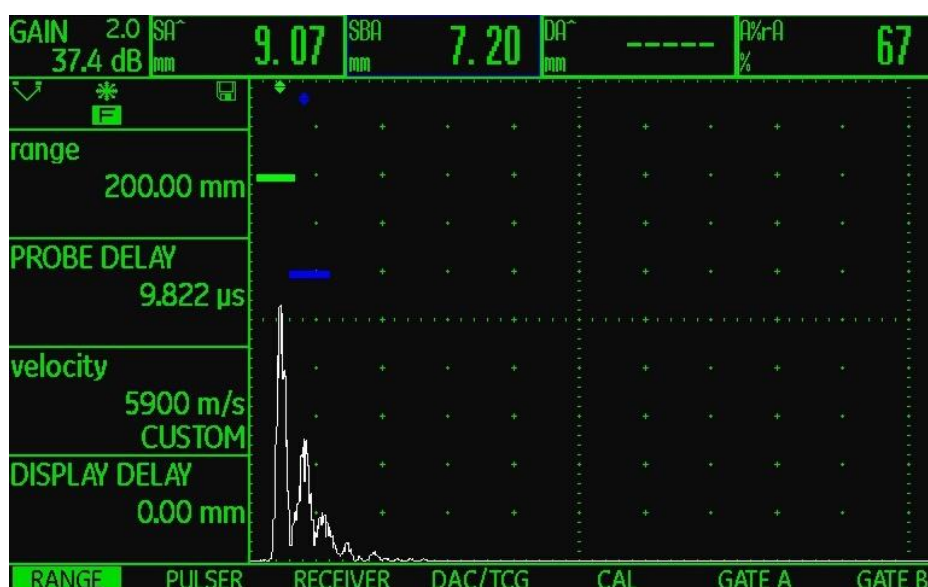


Figura 4.25 - Ultrassom com sonda direita duplo cristal de 2 MHz, numa zona do tubo sem oxidação.

Recorreu-se a uma nova zona, desta vez com oxidação, onde foram efetuados vários testes com o intuito de medir a camada de óxido/aço. Para ambas as regiões as camadas de oxidação tinham um valor aproximado de 5,28 milímetros e a de aço um de 3,36 milímetros. Teoricamente, o SA deveria ser 8,64 milímetros, no entanto existem irregularidades na superfície da camada de aço, sendo mais realista que o SA apresentado fosse um valor aproximado de 9 milímetros. Ao mesmo tempo, o SBA deveria de corresponder ao valor da camada de oxidação.



Figura 4.26 - Ultrassom com sonda direita duplo cristal de 2 MHz, em duas regiões do tubo de aço com elevada quantidade de oxidação.

Contrariamente ao que foi projetado, o SBA não apresenta um valor aceitável para a camada de oxidação. Para que fosse possível observar o sinal na camada de oxidação foi necessário aumentar o ganho para valores elevados, o que levou a um aumento do ruído. Além disso, a repetição dos ecos é imperceptível, pois estes confundem-se com o ruído.

Fundamentalmente, a oxidação influencia de maneira negativa a repetição dos ecos e o sinal só é possível observar com elevado ruído, tornando incorreta a análise da espessura das camadas para regiões do tubo com uma camada de oxidação considerável.

4.5. Ultrassom com EMAT

Os ensaios utilizando o EMAT iniciaram-se com a calibração do equipamento num padrão tipo escada, tal como descrito anteriormente, foi necessário inserir no programa de computador os valores de cada um desses degraus. O pico do sinal com maior amplitude é considerado válido, sendo demonstrado o seu valor no canto superior direito na forma de amostrador digital.

Para o degrau com número 5 a espessura apresentada pelo EMAT deveria de ser 7,87 milímetros, como foi demonstrado pela Figura 3.16.

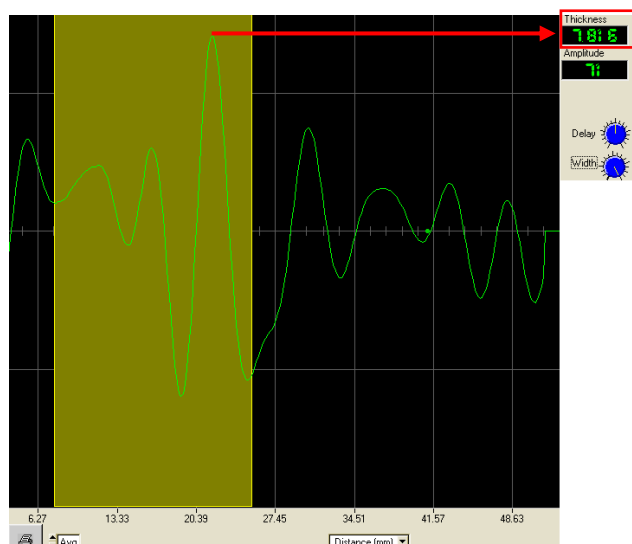


Figura 4.27 - Sinal durante o teste com EMAT para a calibração do degrau 5.

Como se pode observar a diferença entre o valor real e o valor medido está na ordem decimal, sendo o valor real 7,87 milímetros e o valor medido 7,81 milímetros. Assim sendo, pode afirmar-se que a sonda se encontra calibrada e pronta para o início dos testes no tubo.

Para um tubo com uma espessura nominal de aproximadamente 7 milímetros e numa zona onde apenas existe camada de aço, a espessura que o EMAT devia obter seria algo aproximado do valor nominal.

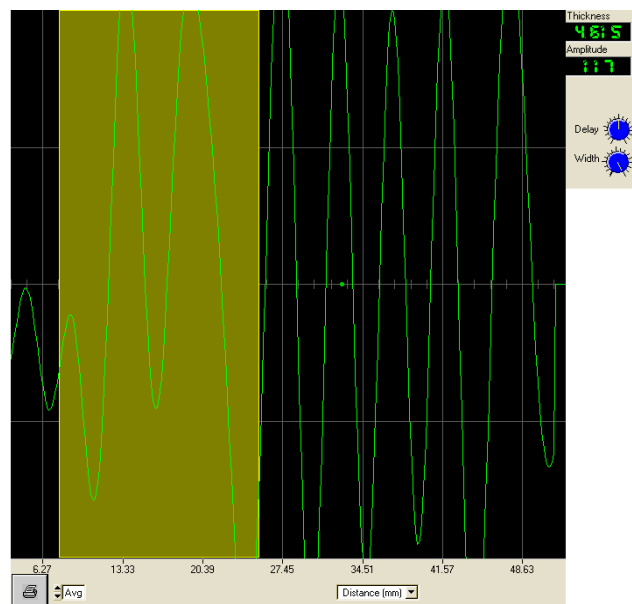


Figura 4.28 - Sinal durante o teste com EMAT para região do tubo apenas com camada de aço.

A resposta do sinal não foi positiva, pois o sinal encontra-se saturado, apresentando inúmeros picos com amplitude superior à janela previamente programada durante a calibração. Tentou-se ainda reduzir o ganho do sinal e aumentar a janela de aquisição, mas o sinal permaneceu inalterado, tendo sido concluído que o EMAT é incapaz de fornecer a espessura da camada de aço.

Outros testes a diferentes camadas, como a de oxidação ou a camada conjunta de aço/coque, foram igualmente negativos, sendo desnecessário colocar o sinal de ambos por serem semelhantes ao sinal anterior.

5. Conclusão

Nos dias de hoje está-se a tentar reinventar e otimizar processos de inspeção de tubos em fornos de refinarias. Como se sabe, a radiografia, no que respeita ao estudo das camadas de coque dentro dos referidos tubos, está amplamente difundida na área das inspeções através de ensaios não destrutivos. No entanto, a formação de coque no interior dos tubos em fornos de refinarias continua a ser um problema que necessita ser investigado, pois ainda que existam técnicas como a radiografia, capazes de identificar e medir estas camadas, elas não estão otimizadas.

Apesar de apenas referir a camada de coque, rapidamente se percebeu que existia mais uma camada que potencialmente traria novas dificuldades ao problema inicial. Esta camada é de oxidação, sendo que em certas zonas no tubo a sua espessura é superior à do próprio aço.

Este trabalho dividiu-se em três fases distintas: radiografia, gamagrafia e ultrassons. Realizou-se a otimização da segunda técnica, pois foi a única considerada apta para a análise e medição da espessura das camadas de coque e oxidação.

Utilizou-se inicialmente a radiografia convencional e digital numa zona do tubo onde a camada de óxido era desprezável. Observou-se duas marcas que se pensou serem as das camadas de aço e coque. No entanto, após várias modificações ao tubo, tais como a remoção de um terço da camada de coque numa das extremidades e a realização de um corte da superfície do aço com dimensões 10x7 mm², percebeu-se que as marcas não coincidiam com as camadas. Primeiro, a marca inferior, que correspondia à do coque, não desaparecia na zona onde o coque tinha sido removido, logo a marca não correspondia a marca de coque. Já a marca superior, que deveria corresponder à camada de aço, tinha de coincidir com o corte feito no tubo, algo que não se verificou. Pensou-se ainda que estas marcas podiam ser uma soldadura feita ao longo do tubo e que não era visível no exterior, contudo as marcas apareceram mesmo para ensaios onde se rodou o tubo de 45°, 90° e 180°. Concluiu-se, assim, que ambas as técnicas são incapazes de distinguir e medir as camadas de aço e coque para um equipamento de raios-X, “Andrex” com 170 keV de energia máxima. No entanto, não foi possível chegar a um consenso sobre o real significado das marcas referidas.

Devido à incapacidade de a radiografia fornecer resultados, passou-se para a Gamagrafia utilizando dois isótopos distintos, Iridio-192 e Selénio-75. Com a introdução desta técnica foi imediatamente possível observar as camadas de aço e coque, sendo possível visualizar tanto o desaparecimento da marca inferior (camada de coque) na extremidade onde o coque foi removido, como a coincidência entre o entalhe feito na superfície de aço do tubo e a marca superior (camada de aço). No entanto, a diferença entre o Ir-192 e o Se-75 foi evidente, sendo claro que o Ir-192 é o isótopo com melhores resultados a nível de tempo de exposição e de definição da imagem.

Um dos parâmetros necessários à otimização destes ensaios é o tempo de exposição. No caso da fonte de Ir-192 conseguiu-se reduzir o tempo de exposição para um máximo de 10 minutos, colocando-se a fonte a 360 milímetros do filme. Para o ensaio com o Se-75, devido à D.O. ter um valor bastante abaixo do ideal na zona da parede tubular, D.O. \approx 2.5, essa redução do tempo de exposição não foi possível. Todos os ensaios foram realizados com aproximadamente 40 Ci de atividade em ambas as fontes, embora apenas seja permitido utilizar estes isótopos em obra quando apresentam uma atividade de 30 Ci. Apesar dos testes para 30 Ci terem sido realizados, não foi possível colocá-los na tese devido à proximidade da data de entrega, problema a que estes ensaios foram alheios uma vez que foi necessário esperar para que a atividade dos isótopos decaísse. Ainda assim, os resultados foram positivos para o Ir-192, sendo possível realizar este tipo de ensaios até um valor de atividade de 25 Ci (valor mínimo testado).

Por último fizeram-se testes com ultrassons, utilizando técnicas como a convencional e o EMAT. Para o caso convencional só foi possível obter a espessura da camada de aço em regiões sem oxidação e sem coque. Concluiu-se que seria impossível obter as espessuras das camadas de oxidação e coque pois, para além da velocidade de propagação do som nestes materiais ser diferente da no aço, são ambos muito atenuadores. A atenuação leva a que não seja possível observar ecos e desta forma não se consiga obter valores corretos das espessuras pretendidas. Além disso, o facto de serem atenuantes exige o aumento do ganho, levando por consequência ao aumento do ruído e perda de qualidade do sinal.

O EMAT foi abordado numa tentativa de dispor de uma técnica de ultrassons que atingisse o objetivo de estudo das camadas, tendo ainda como vantagem a não utilização de um acoplante. No entanto, tal como os ultrassons convencionais, os resultados foram negativos. O EMAT é incapaz de medir a espessura da camada do tubo numa zona onde apenas existe aço pois o sinal apresenta-se saturado e não responde à diminuição do ganho, nem ao redimensionamento da janela de dados. Os sinais retirados de zonas com elevada presença de oxidação ou de coque são irrelevantes uma vez que o EMAT é incapaz de obter o sinal para uma zona onde o material atenuante é desprezável.

Apesar de não ter sido possível reinventar uma nova técnica capaz de fazer o tipo de medições requerido sendo menos perigosa e prejudicial ao ser humano, um dos objetivos principais do trabalho foi conseguido, a obtenção e otimização de uma técnica capaz de medir as espessuras da camada de coque. A Gamagrafia, utilizando o isótopo de Ir-192, não só conseguiu resolver este problema, como também foi capaz de medir a camada de oxidação presente neste tipo de tubos. Assim, o trabalho realizado é fundamental para a implementação desta técnica na indústria através de um ensaio com tempo de exposição reduzido de 10 minutos, com a fonte posicionada a 360 milímetros do filme e com uma atividade testada até cerca de 27 Ci.

6. Bibliografia

- [1] Fired heaters for general refinery service. (2001). Washington, D.C.: American Petroleum Institute.
- [2] Harston, J. and Ropital, F. (2007). Amine unit corrosion in refineries. Cambridge: Woodhead.
- [3] Sequeira, C. (n.d.). High temperature corrosion: Fundamentals and Engineering.
- [4] Scribd. (2019). ASM Specialty Handbook Heat-Resistant Material (585s).pdf. [online] Disponível em: <https://www.scribd.com/document/267851784/ASM-Specialty-Handbook-Heat-Resistant-Material-585s-pdf> [Visitado 5 abril 2019].
- [5] Smith, W. and Smith, W. (1993). Foundations of materials science and engineering. New York: McGraw-Hill.
- [6] Riazi, M. (2005). Characterization and properties of petroleum fractions. West Conshohocken, Pa: ASTM International.
- [7] Barletta, T. (2001). Why Vacuum Unit Fired Heaters Coke. [online] p.6. Disponível em: <https://www.revamps.com/articles/why-vacuum-unit-fired-heaters-coke/>.
- [8] Abendi.org.br. (2019). [online] Disponível em: http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/Radiologia-Nov-2013_pdf%20substituir.pdf [Visitado 27 março 2019].
- [9] Relacre.pt. (2019). [online] Disponível em: <http://www.relacre.pt/assets/relacreassets/files/commissionsandpublications/Capa-Manual-RT12-site.pdf> [Visitado 30 março 2019].
- [10] Anon, (2019). [online] Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-64-Esquema-ilustrativo-de-um-tubo-de-raios-X-Eletrons-sao-emitidos-termicamente_fig18_322940573 [Visitado 27 março 2019].
- [11] Duerr-ndt.de. (2019). Downloads | DÜRR NDT. [online] Disponível em: <https://www.duerr-ndt.de/downloads-de.html> [Visitado 29 maio 2019].
- [12] Relacre.pt. (2019). [online] Disponível em: http://www.relacre.pt/assets/relacreassets/files/commissionsandpublications/Capa-Manual-Ultrassons_site.pdf [Visitado 15 janeiro 2019].
- [13] Matéria, T. and Óptica, O. (2019). Ondas na Física: definição, tipos, fórmulas. [online] Toda Matéria. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/ondas/> [Visitado 3 abril 2019].
- [14] Worden, K. (2001). Rayleigh and Lamb Waves - Basic Principles. Strain, 37(4), pp.167-172.

- [15] Applied Geophysics. (1990). 2nd ed. Cambridge University Press 1990.
- [16] Nde-ed.org. (2019). Characteristics of Piezoelectric Transducers. [online] Disponível em: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Equipment-Trans/characteristicspt.htm> [Visitado 10 setembro 2019].
- [17] Slideplayer.com. (2019). BMFB 4283 NDT & FAILURE ANALYSIS - ppt download. [online] Disponível em: <https://slideplayer.com/slide/5663914/> [Visitado 2 setembro 2019].
- [18] Kwun, H.; Kim, S.; Crane, J. Method and Apparatus Generating and Detecting Torsional Wave Inspection of Pipes or Tubes. U.S. Patent 6,429,650B1, 6 August 2002
- [19] En.wikipedia.org. (2019). Electromagnetic acoustic transducer. [online] Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_acoustic_transducer#/media/File:EMATDIA.JPG [Visitado 8 abril 2019].
- [20] Patentimages.storage.googleapis.com. (2019). [online] Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/73/ee/6c/8cd729067e92ea/US5760307.pdf> [Visitado 10 abril 2019].
- [21] Frost, H. (1979). Electromagnetic-ultrasound transducers. [New York]: Academic Press.
- [22] Murayama, R., Fujisawa, K., Fukuoka, H. and Hirao, M. (1996). Development of an on-line evaluation system of formability in cold-rolled steel sheets using electromagnetic acoustic transducers (EMATs). NDT & E International, 29(3), pp.141-146.
- [23] Wang, S., Huang, S., Zhang, Y. and Zhao, W. (2016). Modeling of an omni-directional electromagnetic acoustic transducer driven by the Lorentz force mechanism. Smart Materials and Structures, 25(12), p.125029.
- [24] Cong, M., Wu, X. and Qian, C. (2016). A Longitudinal Mode Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) Based on a Permanent Magnet Chain for Pipe Inspection. Sensors, 16(5), p.740.
- [25] ISO 20769-2 (2018), Non-destructive testing- Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays- Part 2: Double wall radiographic inspection.
- [26] ISO 20769-1 (2018), Non-destructive testing- Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays- Part 1: Tangential radiographic inspection.

A Procedimento de medição da camada de coque de tubos de refinaria através da radiografia



A.1 Âmbito

Este procedimento visa a medição da camada de coque em tubos de refinaria, uma camada interior aos tubos composta por carbono e hidrogénio. A camada de coque atua mais tarde como isolador térmico que dificulta o processo de monitorização da real temperatura dentro dos tubos e que a longo prazo causa danos irreversíveis no próprio tubo. Este procedimento utiliza a técnica não destrutiva Radiografia para monitorizar e quantificar esta camada de coque.

A.2 Qualificação de Técnico

O técnico responsável por realizar os testes de acordo com o procedimento deve ser qualificado e certificado com o nível mínimo II em RT de acordo com a norma ISO 9712 ou equivalente no setor industrial relevante.

A.3 Referências de Normas

ISO 20769-1, Non-destructive testing- Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays- Part 1: Tangential radiographic inspection.

ISO 20769-2, Non-destructive testing- Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays- Part 2: Double wall radiographic inspection.

A.4 Equipamento

- Comparador, íman na forma de disco com espessura conhecida;
- IQI;



Figura A.1 - IQI apropriado a este ensaio.

- Filmes radiográficos de classe C3;
- Fonte de Iridio ($27 \text{ Ci} < \text{Atividade} < 30 \text{ Ci}$);
- Ponteira;
- Colimador;
- Negatoscópio;
- Densitómetro;

A.5 Ensaio

Estes tubos têm aproximadamente 7 milímetros de espessura nominal, sendo o ensaio realizado o tangencial. O comparador deverá ser um ímã com espessura previamente conhecida e colocado sobre a parede a radiografar.

A ponteira da fonte deve estar alinhada com a parede do tubo e com o comparador, a determinada distância do filme (SDD) de classe C3 que estará alinhado paralelamente à parede do tubo.

A abordagem radiográfica inicia-se com o cálculo de duas grandezas: SDD, distância a que a fonte deve estar do filme e w_{max} , espessura máxima de penetração.

$$SDD \geq \frac{d \times PDD}{0,6 \text{ mm}} (=) SDD \geq \frac{3 \text{ mm} \times 72 \text{ mm}}{0,6 \text{ mm}} (=) SDD \geq 360 \text{ mm} \quad (\text{A.1})$$

d - Tamanho da fonte; PDD - Distância entre o centro do tubo e o filme.

$$w_{max} = 2 \times \sqrt{t(D_e - t)} (=) w_{max} = 2 \times \sqrt{7 \text{ mm} (144 \text{ mm} - 7 \text{ mm})} \approx 61,93 \text{ mm} \quad (\text{A.2})$$

t - Espessura nominal do tubo; D_e - Diâmetro exterior do tubo.

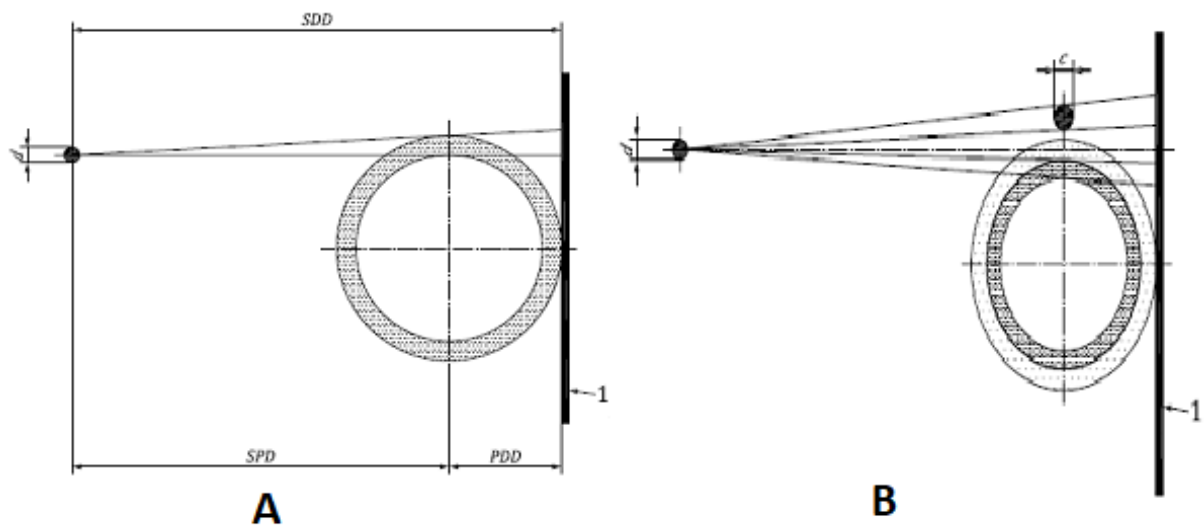


Figura A.2 - (A) - Radiografia Tangencial. (B) - Radiografia Tangencial com comparador.

A fonte de Irídio tem de ter uma atividade igual ou inferior a 30 Ci e o tempo de exposição deste ensaio deve de ser 10 minutos. O IQI deve ser posicionado na horizontal ao longo do filme, paralelamente à parede do tubo.

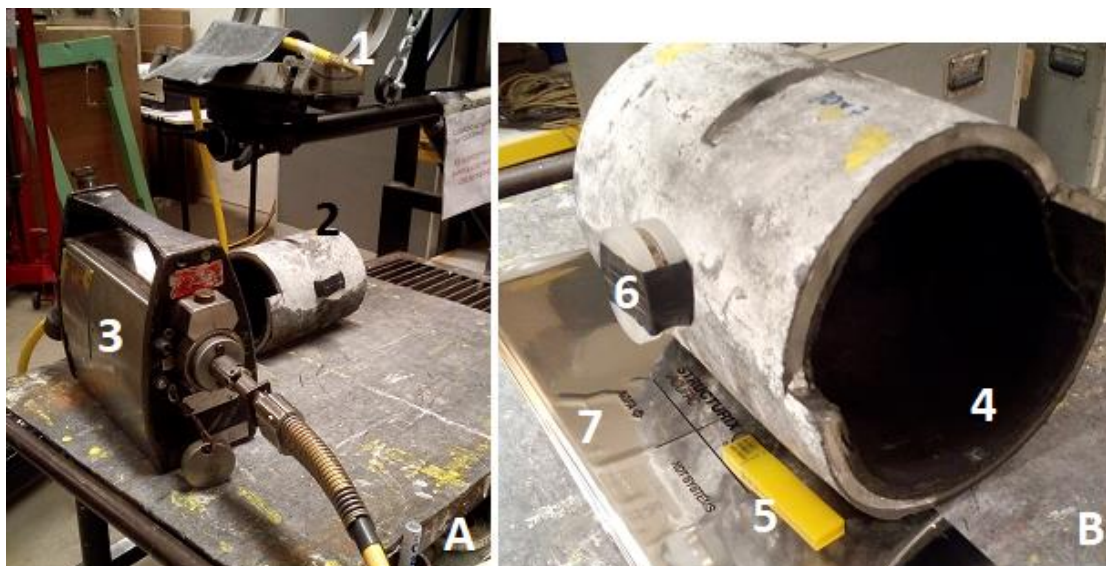


Figura A.3- Montagem experimental, (A) 1- Ponteira; 2- Tubo; 3- Equipamento de raios gama; (B) 4- Coque; 5- IQI; 6- Comparador; 7- Filme.

A.6 Interpretação

O ensaio resultará na obtenção da espessura das três camadas presentes no tubo, oxidação, aço e coque. No entanto, essas espessuras não correspondem ao valor real das mesmas. Devido à projeção da radiação, as espessuras obtidas serão superiores aos valores reais, assim é necessário calcular o valor real do comparador 5,9 milímetros e os valores obtidos do comparador e das camadas através da seguinte fórmula:

$$\text{Valor real da camada} = \frac{\text{valor real do comparador} \times \text{valor obtido da camada}}{\text{valor obtido do comparador}} \text{ (mm)} \quad (\text{A.3})$$

Um exemplo do resultado a obter após a realização do ensaio está representado na Figura A.4:



Figura A.4- Radiografia com Ir-192 com comparador e IQI; SDD = 360 mm; 10 min

